

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ACTIVO EN LA PROTECCIÓN
DE UNA EDIFICACIÓN DURANTE UN SISMO**

PRESENTADO POR:

BACH. JHONY BENIQUE PARICELA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

JULIACA-PERU

2016

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ACTIVO EN LA PROTECCIÓN
DE UNA EDIFICACION DURANTE UN SISMO**

PRESENTADO POR:

BACH. JHONY BENIQUE PARICELA

JULIACA-PERU

2016

INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	ix
DEDICATORIAS.....	x
PRESENTACIÓN	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPITULO I.....	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DEL INVESTIGACIÓN.....	14
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	14
1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO.....	14
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
CAPITULO II.....	17
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	17
2.1.1 AMENAZAS NATURALES QUE AFECTAN AL PERÚ	17
2.1.2 SISMICIDAD EN EL PERÚ	18
2.1.3 REGISTRO SÍSMICO EN EL PERÚ	18
2.1.4 RED DE ACELEROMETROS	19
2.2 SUSTENTO TEÓRICO.....	22
2.2.1 SISMOGRAMAS Y ACELOROGRAMAS.....	22
2.2.1.1 TECTONICA Y SISMICIDAD GLOBAL.....	22
2.2.1.2 FALLAS GEOLÓGICAS	23
2.2.1.3 MECANISMO FOCAL	24
2.2.1.4 PREMITORIOS Y REPLICAS	25
2.2.1.5 ONDAS SÍSMICAS.....	26
2.2.1.6 SISMOGRAMAS	26
2.2.1.7 MAGNITUDD DEL SISMO	27
2.2.2 ACELEROGRAMAS.....	30
2.2.2.1 REGISTROS ACELEROGRAFICOS.....	32
2.2.2.2 DEFINICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS MÁXIMOS DEL TERRENO.....	33
2.2.2.3 TIPOS DE TEMBLORES SEGÚN ACELEROGRAMA.....	35
2.2.2.4 ESTUDIOS DE AMENAZA SÍSMICA	37
2.2.3 ACELERACIÓN SÍSMICA.....	37
2.2.3.1 CORRELACIÓN CON LA ESCALA MERCALLI.....	38

2.2.4	SISTEMAS DINÁMICOS DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	38
2.2.4.1	VIBRACIÓN LIBRE NO AMORTIGUADA.....	38
2.2.4.2	VIBRACIÓN LIBRE AMORTIGUADA.....	42
2.2.4.3	AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO.....	45
2.2.4.4	AMORTIGUAMIENTO MAYOR QUE EL CRÍTICO.....	46
2.2.4.5	AMORTIGUAMIENTO MENOR QUE EL CRÍTICO.....	46
2.2.5	ESPECTRO DE RESPUESTA.....	48
2.2.5.1	SEÑALES Y SISTEMAS.....	48
2.2.5.2	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	50
2.2.5.3	ANÁLISIS DE FOURIER.....	50
2.2.6	SISTEMAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	52
2.2.6.1	SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VIBRACIONES.....	53
2.2.7	SISTEMA DE CONTROL DE LA RESPUESTA DINÁMICA.....	55
2.2.8	SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL.....	58
2.2.8.1	SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO.....	60
2.2.9	MODELADO EN EL ESPACIO DE ESTADOS.....	63
2.2.9.1	TEORÍA DEL CONTROL MODERNO FRENTE A TEORIA DE CONTROL CONVENCIONAL.....	64
2.2.10	TRANSFORMADOR DIFERENCIAL VARIABLE LINEAL (LVDT).....	68
CAPITULO III.....		69
3.	HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	69
3.1	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	69
3.1.1	HIPÓTESIS GENERAL.....	69
3.1.2	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	69
3.2	VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	69
3.2.1	VARIABLE INDEPENDIENTE.....	69
3.2.2	VARIABLE DEPENDIENTE.....	69
CAPITULO IV.....		70
4.	METODOLOGÍA O DISEÑO METODOLOGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	70
4.1	TIPO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	70
4.2	DISEÑO experimental DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	70
4.2.1	MANIPULACIÓN DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE.....	71
4.2.1.1	CARACTERISTICAS DE LA MESA VIBRATORIA.....	71
4.2.2	POBLACION DE LA INVESTIGACIÓN.....	72
4.2.3	MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN.....	72
4.2.4	UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN.....	73
4.3	sistema activo de control de masa (amd).....	73
4.3.1	ESTRUCTURA EXPERIMENTAL.....	74
4.3.1.1	MODELO DE EVALUACIÓN.....	75
4.3.1.2	ANALISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ACTIVO CON MATLAB.....	77
CAPITULO V.....		88
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
5.1	CONCLUSIONES.....	88

5.2	RECOMENDACIONES.....	88
6.	Bibliografía.....	89

INDICE DE TABLAS

Tabla. 1 Cuadro cronológico de amenazas naturales en el Perú	17
Tabla. 2 Sismicidad en el Perú	18
Tabla. 3 Correlación con la escala mercalli.....	38
Tabla. 4 Categoría de las edificaciones según reglamento de edificaciones RNE 0.30	72
Tabla. 5 Respuesta de mediciones RMS en la edificación (0-50Hz)	87

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Red de acelerómetros en el Perú	21
Fig. 2 Distribución superficial de las placas litósfericas	23
Fig. 3 Falla Geológica de Nazca.....	24
Fig. 4 Sismograma.....	27
Fig. 5 Mapa isostático sismo de Arequipa 23 de junio 2001.....	30
Fig. 6 Estación de un acelerógrafo	31
Fig. 7 Aceleración, velocidad y desplazamiento corregidos sismo 17/10/1966 Lima- Perú Instituto geofísico del peru componente, N08E Valores Pico: Acel: 263.3 cm/s ² , Veloc: 21.60cm/s, Despl:-16.60cm	32
Fig. 8 Sistema elástico de primer orden	39
Fig. 9 Sistema lineal amortiguado de un grado de libertad	43
Fig. 10 Modelo de un sistema.....	48
Fig. 11 Proceso de muestreo.....	50
Fig. 12 Ubicación de los sistemas de disipación de energía.....	55
Fig. 13 Sistemas de control estructural.....	57
Fig. 14 Esquema de un sistema de control activo.....	62
Fig. 15 Aplicación del sistema AMD en edificaciones	63
Fig. 16 Transformador LVDT	68
Fig. 17 Diseño del sistema de prueba	71
Fig. 18 Estructura Experimental del control activo AMD.....	75
Fig. 19 Modelo de Evaluación del sistema control AMD	76
Fig. 20 Modelo de Analisis del sistema AMD con Matlab.	77
Fig. 21 Filtro Kanai-Tajimi	79
Fig. 22 Desplazamientos relativos sin control en la estructura de prueba.....	80
Fig. 23 Modelo de Control Estructural AMD	80
Fig. 24 Desplazamientos y aceleraciones en la edificación de prueba aplicando control AMD.....	82
Fig. 25 Aplicación del sistema de control sobre una señal sísmica de desplazamiento .	83
Fig. 26 Aplicación del sistema de control sobre una señal de aceleración.....	84
Fig. 27 Señales de control del sistema AMD	85
Fig. 28 Desplazamientos y aceleraciones aplicado RMS	86
Fig. 29 Respuesta del sistema de control activo AMD sobre el acelerograma del sismo del 23 de Junio del 2001 Ocoña.....	87
Fig. 30 Respuesta del sistema de control activo AMD sobre el acelerograma del sismo del 15 de agosto del 2007 Nazca.	87

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los ser que me dio la vida, mi madre, que hizo de mí un hombre de valores.

Agradezco a la Universidad Alas Peruanas por guiarme en esta nueva carrera.

Agradezco a los Docentes de la universidad ALAS peruanas por su guía académica.

Agradezco a mi esposa, por su paciencia y motivación para la culminación de la presente tesis.

Agradezco a los jurados, que con sus sabios consejos e indicaciones hicieron posible la culminación de la presente tesis.

DEDICATORIAS

Dedico el presente trabajo de investigación a mi hijo Erwin Rommy, que con su inocencia y sublime saber me alegra la vida.

PRESENTACIÓN

En las últimas décadas los ingenieros e investigadores en el área de ingeniería estructural, ha ido renovando diversos cuidados en el diseño sismoresistente, con el objetivo que las edificaciones sean diseñados de acuerdo con los requerimientos mínimos de fuerza lateral de los reglamentos de diseño. Los recientes sismos han demostrado que los edificios diseñados y construidos de acuerdo a los reglamentos actuales tienen una buena respuesta.

En la región de Puno, específicamente en la ciudad de Juliaca, se están construyendo edificaciones elevadas, lo que conlleva a tener mucho cuidado a la hora de efectuar los pre dimensionamientos respectivos de los elementos estructurales.

Es necesario además de respetar los reglamentos de edificación sismo resistente, algunas metodologías, que todavía no contempla el actual reglamento de edificaciones de diseños antisísmico, la norma E.030.

Los sistemas de control activo, son sistemas de protección sísmica inteligente, que se ubican en la parte superior de la edificación, que consiste en una masa que representa el 1% del peso total de la estructura, que realiza un movimiento contrario a la dirección de sismo, para variar la frecuencia fundamental del edificio, este procedimiento se logra con un conjunto de sensores ubicados en cada nivel de la edificación el cual envía la información a centro de control computarizado, que ordena a un actuador mover la masa en dirección contraria al desplazamiento de la estructura.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis estudiáramos un sistema de control activo de protección sísmica. El sistema amortiguador de masa activa, conocido por sus siglas en ingles AMD (Active Mass Dampers), se emplea para la reducción de vibración en una edificación.

Se aplicara sobre un modelo de edificación que consta de 03 niveles, ubicado en la ciudad de Juliaca, el cual previamente se diseñó con la norma E.030 (Diseño Sismoresistente). Sobre esta edificación se modelo el sistema de control activo, para lo cual se aplica un sismo ocurrido recientemente en el Peru, el desempeño de sistema de control activo se verifico en simulación y experimentalmente excitando la estructura en su base con los sismos de Nazca 2001 y Nazca 2007, observando disminuciones en la aceleración relativa de la estructura hasta en 80 % y desplazamientos relativos inferiores al 1% de la altura.

En la simulación realizada con el software Matlab, se pudo verificar la eficiencia del sistema de control de masa activa, en la reducción significativa de las aceleraciones de la señal de sismo en la parte superior del edificio en prueba.

ABSTRACT

In this thesis we study a system of active control of seismic protection. The active mass damper system, known by its acronym in English AMD (Active Mass Dampers), is used for reducing vibration in a building.

It is applied on a model building consisting of 10 levels located in the city of Juliaca, which previously was designed with the standard E.030 (Design Earthquake-resistant). This building is modeled on the active control system, for which an earthquake occurred recently applied in Peru, the performance of active control system was verified in simulation and experimentally exciting the structure at its base with earthquakes Nazca 2001 born 2007, observing decreases in the relative acceleration of the structure by up to 80% and relative displacements less than 1% of the height.

In the simulation performed with the Matlab software, it is able to verify the efficiency of the control system of active mass in the significant reduction of the acceleration signal quake at the top of the building under test.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DEL INVESTIGACIÓN

En los últimos años los investigadores en el área de la ingeniería estructural, han ido incrementando diversos cuidados, con la finalidad que los edificios sean diseñados acordes con los requerimientos mínimos de fuerza lateral de los códigos.

Diversos esfuerzos en el estudio sismo resistente, se han centrado en desarrollar criterios de diseño sísmico y procedimientos para asegurar objetivos específicos del desempeño. Tres técnicas innovadoras han sido propuestas para usarse individualmente o en combinación, con la finalidad de mejorar el desempeño sísmico de los edificios: aislamiento sísmico, dispositivos suplementarios de disipación de energía y control estructural activo o híbrido.

El sistema de control estructural activo no está incluido en la norma peruana vigente.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En una edificación ante un evento de sismo, requiere una respuesta dinámica favorable, los desplazamientos laterales debes ser mínimos.

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Qué tipo de sistema de control estructural permitirá la protección de una edificación ante un evento de sismo?

1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO

¿Cómo es el esquema de funcionamiento de un sistema de control activo?

¿De qué manera reduce las aceleraciones en la estructura el sistema de control activo?

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el sistema de control activo en la protección de una edificación durante un sismo.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudiar el esquema de funcionamiento de un sistema de control activo.

Analizar el sistema de control activo para reducir las aceleraciones en la estructura durante un evento de sismo.

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El Perú está ubicado en el cinturón de fuego del pacífico, una de las regiones sísmicamente más activas del mundo; por lo que los eventos sísmicos nos han acompañado desde siempre. Muchos de estos sismos (1970, 2001, 2007, etc.) han ocasionado pérdidas económicas considerables, así como pérdidas humanas dejando además heridos y damnificados.

Los efectos perjudiciales que dejan los terremotos no dependen directamente de este fenómeno natural, sino de las fallas en las estructuras construidas por el ser humano.

Este hecho nos exige tener un buen entendimiento del comportamiento de estas estructuras, así como de las tecnologías sísmicas existentes con el fin de reducir el nivel de daño estructural y prevenir posibles fallas catastróficas.

Es así que en las últimas décadas se han venido desarrollando diversos avances tecnológicos para la mejora del desempeño de las estructuras frente a

solicitaciones sísmicas. Uno de estos avances son los sistemas de control activo, los cuales ya se vienen empleando en diversos países tales como Taiwán, Los Estados Unidos, Japón, entre otros y la experiencia que se ha obtenido con uso de estos dispositivos muestra su gran capacidad para reducir la demanda sísmica en las estructuras.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Es comúnmente aceptado que los terremotos tienen como origen roturas bruscas de la corteza terrestre seguidas de la liberación casi instantánea de la energía acumulada en el interior de la tierra. Los más fuertes y frecuentes terremotos son los tectónicos, que están asociados a los movimientos de la litosfera terrestre. Los principales fenómenos que se producen durante un terremoto consisten, por una parte, en deformaciones tectónicas y por otra, en la emisión y transmisión de ondas a través de la tierra. Los principales factores que afectan a las deformaciones tectónicas son las características geométricas de la fuente sísmica.

2.1.1 AMENAZAS NATURALES QUE AFECTAN AL PERÚ

El Perú es considerado como un país de alto riesgo ante la ocurrencia de amenazas naturales por estar ubicado en el círculo de fuego del pacífico y cerca de la zona intertropical, donde se originan las mayores amenazas.

Tabla. 1 Cuadro cronológico de amenazas naturales en el Perú

Año	Amenaza natural	Departamento
1970	Aluvión	Huaraz-Ancash
1982-1983	Sequias	Puno
1987	Huaycos	Chosica – Lima
1990	Erupción Volcánica	Arequipa
1996	Tsunami	Chimbote-Ancash
1996	Terremoto	Nazca-Ica
1997	Deslizamiento	Cuzco
1997-1998	Inundaciones	Piura, Tumbes
2001	Terremoto	Arequipa, Moquegua y
2004	Heladas, friajes	Arequipa, Puno y Cuzco

Fuente: Instituto Geofísico del Perú.

La presente recopilación se centra en los eventos sísmicos y los fenómenos meteorológicos asociados al Fenómeno del Niño.

Los sismos más recientes, producidos en la zona sur del país, departamentos de Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna, han impactado significativamente la salud, infraestructura y economía de las poblaciones afectadas.

2.1.2 SISMICIDAD EN EL PERÚ

Entre los años 1552 y 1877, se ha registrado la ocurrencia de 14 sismos con magnitudes estimadas de 7.2 a 8.6 grados en la escala de Mercalli Modificada. En este periodo ocurrió el sismo del 28 de Octubre de 1746, que prácticamente destruyó la ciudad de Lima.

Tabla. 2 Sismicidad en el Perú

Fecha			Hora Local	Epicentro Aproximado		Lugar	Magnitud
				Lat. S	Long. W		
2	Enero	1582	11:30	16.3	73.3	Costa Dpto de Arequipa	7.9
9	Julio	1586	19:30	12.2	77.7	Costa Dpto. de Lima	8.1
2	Noviem	1604	13:30	18.0	71.5	Costa Moquegua y Tacna	8.4
1	Febrero	1619	11:30	8.0	79.2	Costa de Trujillo	7.8
3	Marzo	1650	14:00	13.8	72.0	Cuzco	7.2
1	Noviem	1655	14:38	12.0	77.4	Frente Isla San Lorenzo	7.4
1	Mayo	1664	04:15	14.0	76.0	Ica	7.8
2	Octubre	1687	05:30	13.0	77.5	Costa Sur Dpto. Lima	8.2
2	Octubre	1746	22:30	11.6	77.5	Costa Norte Dpto. Lima	8.4
1	Mayo	1784	07:36	16.5	72.0	Costa de Arequipa	8.0
7	Diciemb	1806	18:00	12.0	78.0	Frente Pto. Del Callao	--
1	Julio	1821	13:00	16.0	73.0	Costa de Arequipa	7.9
1	Agosto	1868	16:45	18.5	71.2	Costa de Tacna	8.6
9	Mayo	1877	20:28	19.5	71.0	Costa de S. De Arica	--

Fuente: Instituto Geofísico del Perú.

2.1.3 REGISTRO SÍSMICO EN EL PERÚ

La historia del Instituto Geofísico del Perú se remonta al año 1920 aproximadamente, fecha en que se crea el Observatorio Geofísico de Huancayo (provincia de Huancayo, Departamento de Junín). Sin embargo,

es necesario considerar que el Instituto Geofísico pasó por tres etapas antes de constituirse como tal. En una primera etapa (entre 1922-1947) el Observatorio Magnético de Huancayo estuvo bajo la administración del Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie de Washington, y en un segundo periodo (1947-1962,) funcionó bajo el nombre de Instituto Geofísico de Huancayo (IGH), siendo este un organismo autónomo del Gobierno del Perú. Finalmente, en enero de 1962 (en remplazo del IGH) surge el Instituto Geofísico del Perú (IGP) con el acuerdo de trasladar la sede ejecutiva de Huancayo a Lima.

2.1.4 RED DE ACELEROMETROS

La red acelerométrica del IGP está integrada por un total de 21 estaciones distribuidas en mayor número en la ciudad de Lima (7 estaciones). Estas estaciones registran la aceleración del movimiento del suelo producido por el sismo, el mismo que se caracteriza por su alto contenido de frecuencias, de ahí la importancia que esta información tiene para su aplicación en la ingeniería sísmica.

Históricamente, las primeras estaciones acelerométricas (acelerógrafos) funcionaron en el Parque de la Reserva y en el campus de la Universidad de la Molina, estando esta última aun operativa, pero con instrumental moderno. Son parte de la red, los 3 acelerómetros que vienen funcionando en el proyecto Mantaro-Tablachaca (Huancavelica).

En general, todos los acelerómetros registran la información in situ, siendo accesibles en tiempo real las estaciones que se encuentra funcionando en

Lima (7 estaciones) y algunas en el interior del país interconectado con la sede central por línea de internet (indicados con círculos en el mapa).

En la actualidad, el IGP ha presentado un proyecto al Gobierno Central para la adquisición de 169 acelerómetros para ser distribuidos en todo el país y deben cumplir la función de proporcionar información para el mejor conocimiento de la calidad del suelo en cada ciudad, mejorar nuestra norma sismorresistente y permitirnos disponer de valores de intensidad instrumental a efectos de cuantificar los daños producidos por los sismos. Este proyecto fue aprobado en su primera etapa, quedando aun a la espera de lograrse el financiamiento que será en provecho de la sociedad.

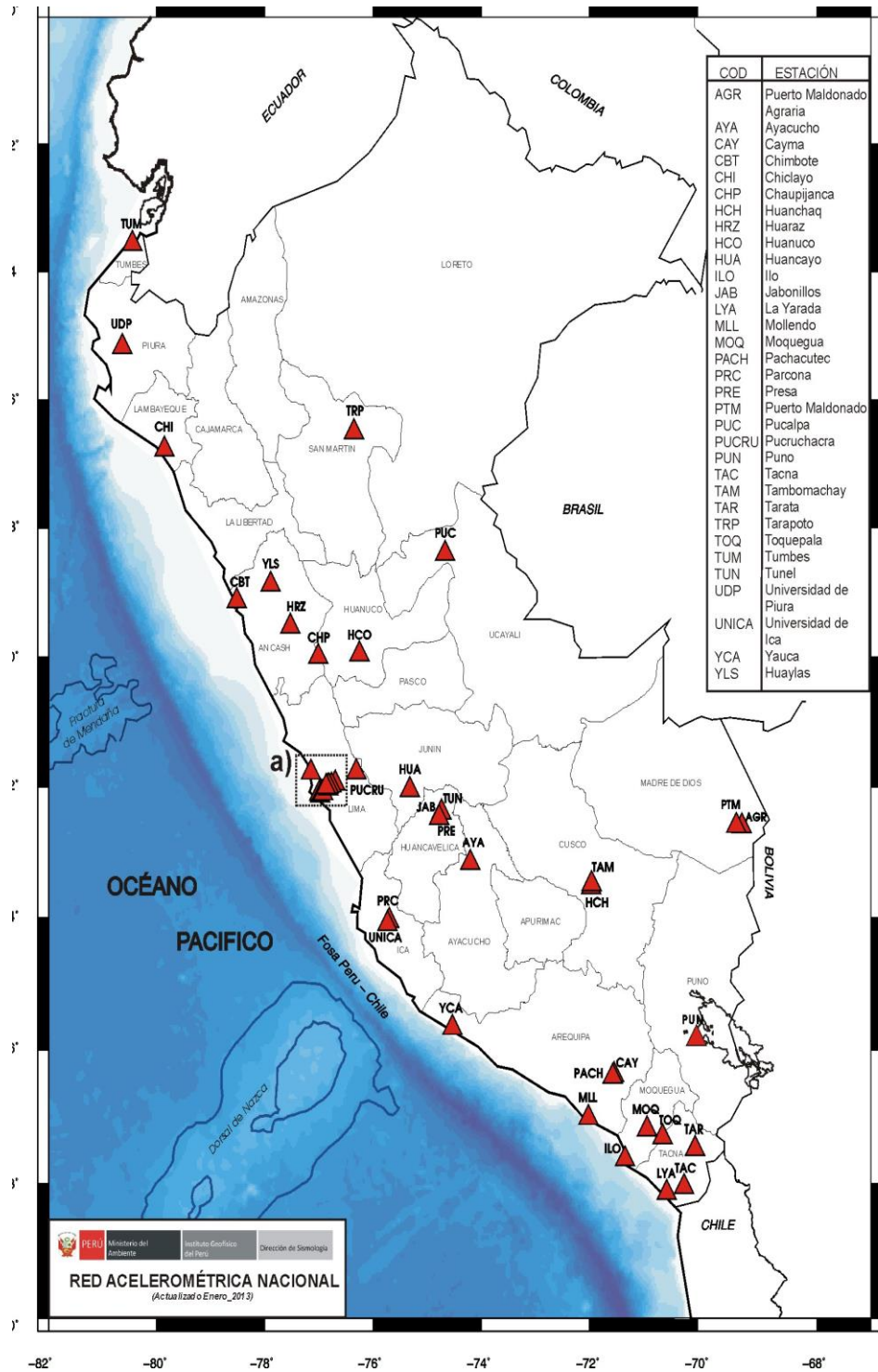


Fig. 1 Red de acelerómetros en el Perú

2.2 SUSTENTO TEÓRICO

2.2.1 SISMOGRAMAS Y ACELOROGRAMAS

2.2.1.1 TECTONICA Y SISMICIDAD GLOBAL

Al aceptar la comunidad científica el hecho de que la corteza terrestre está en un estado permanente de cambio, la explicación sobre las causas de los sismos fue adquiriendo connotaciones cada vez más realistas. La corteza terrestre es relativamente delgada. Se extiende hasta profundidades de 70km en los océanos y 150km bajo los continentes.

Hay fuerzas bajo la corteza terrestre que hacen que estas placas tectónicas se muevan a velocidades pequeñas del orden de centímetros por año. La causa de estas fuerzas no está muy entendida, pero la explicación prevaleciente en la actualidad es que son causadas por flujos lentos de magma en el manto terrestre. Estos flujos son producidos por convección térmica y por los efectos dinámicos de la rotación de la tierra. En algunas regiones las placas se están separando en la medida que sale de la superficie nuevo material de corteza desde el interior de la tierra, estos lugares en general están localizados en el fondo de los océanos y tienen nombre de crestas o dorsales marinas.

La gran mayoría de los sismos en el mundo ocurre en las fronteras entre placas. Estos sismos se conocen con el nombre de sismos tectónicos. Un porcentaje pequeño de los sismos que ocurren en el mundo se localiza en el interior de las placas tectónicas y reciben el nombre de sismos interplaca. Además en algunas regiones del

mundo donde hay volcanes, las erupciones generalmente son acompañadas por sismos que se conocen con el nombre de sismos volcánicos.



Fig. 2 Distribución superficial de las placas litósfericas

2.2.1.2 FALLAS GEOLÓGICAS

Las fallas geológicas que son capaces de producir sismos se conocen con el nombre de fallas activas. Los esfuerzos que induce en la corteza terrestre el movimiento entre las placas en la subducción producen fallamientos dentro de la placa, algunas veces alejados de la zona de subducción. En razón de lo anterior, la acumulación de energía causada por la imposición de movimiento puede conducir a deslizamiento pequeños, pero permanentes. En este caso no se presentan sismos.

Cuando la fricción entre las superficies del fallamiento es alta se produce lo que se llama un engatillamiento de la falla. Cuando la energía acumulada vence esta fricción se presenta un deslizamiento súbito de la falla, asociado con la liberación de la energía acumulada, lo cual produce el sismo.

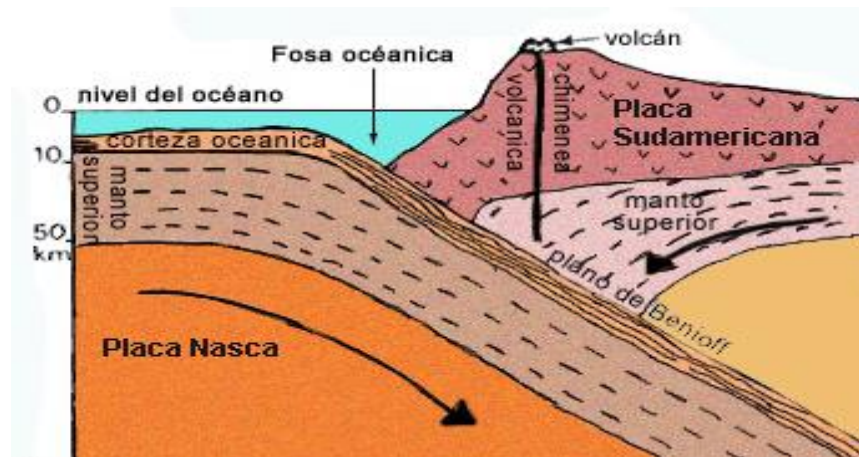


Fig. 3 Falla Geológica de Nazca

2.2.1.3 MECANISMO FOCAL

Al ocurrir un sismo, el punto donde se inicia la ruptura es el punto donde comienza la liberación de energía del sismo, y se conoce con el nombre de hipocentro o foco del sismo. Para un sismo pequeño es razonable considerar el hipocentro como el punto donde se libera energía. En un sismo grande donde la ruptura puede involucrar cientos de kilómetros cuadrados de superficie de falla, el punto de inicio de la liberación de energía sigue siendo el hipocentro del temblor, pero en general no es descriptivo de la zona de fallamiento. El epicentro es la proyección sobre la superficie de la tierra del hipocentro y la profundidad focal es la profundidad del

hipocentro, medida desde el epicentro. La distancia focal es la distancia al hipocentro desde un punto cualquiera de referencia.

En general los sismos se dividen en: superficiales, cuando ocurren a profundidades menores de 70km, de foco intermedio, entre 70 y 300km y profundos cuando su profundidad es mayor de 300km. Existen registros de sismo hasta profundidades de 700km. Desde el punto de vista de los efectos del sismo, definitivamente, entre mas superficial, mayor su predisposición de producir daño. En aquellas regiones de la Tierra donde existen cadenas montañosas importantes, suelen presentarse sismos dentro de toda gama de profundidades, mientras en aquellas regiones donde la corteza terrestre es delgada, hay una mayor preponderancia de los sismos superficiales.

2.2.1.4 PREMITORIOS Y REPLICAS

En algunos casos se presentan uno o varios sismos pequeños, antes de la ocurrencia del evento principal. Estos eventos se conocen con el nombre de premonitorios. De igual manera, con posteridad a un sismo importante, se presentan temblores de menor magnitud, a los que se le conoce con el nombre de réplicas. Solo los sismos superficiales y de profundidad moderada producen replicas, las cuales son de gran importancia para determinar el plano de falla, y esta es la razón por la cual se instalan redes sismológicas móviles con posteridad a un sismo de importancia.

2.2.1.5 ONDAS SÍSMICAS

La energía liberada por el sismo se propaga por medio de varios tipos de ondas sísmicas. Las ondas de cuerpo que se generan en el punto de ruptura incluyen ondas P (principales u ondas de dilatación), las cuales manifiestan desplazamientos de las partículas en la misma dirección de la propagación de la onda, y ondas S (secundarias u ondas de cortante) que manifiestan desplazamientos de las partículas en la dirección perpendicular a la dirección de propagación.

Cuando las ondas llegan a la superficie, se reflejan pero al mismo tiempo inducen ondas de superficie, entre las cuales se cuentan las ondas de Rayleigh y las ondas de Love (Ondas R y L respectivamente). Las ondas de Love producen movimientos horizontales transversales a la dirección de propagación. Las ondas de Rayleigh producen movimientos circulares semejantes al de las olas en el mar. La amplitud de estas ondas decrece marcadamente con la profundidad medida desde la superficie.

2.2.1.6 SISMOGRAMAS

Uno de los instrumentos empleados en sismología es el sismógrafo, el cual es adecuado para registrar sismos que ocurren a distancias apreciables, inclusive de miles de kilómetros. Los sismógrafos, en general, se salen de rango de medición cuando el sismo ocurre cerca de su localización. El registro obtenido por este instrumento se denomina sismograma.

Allí puede identificarse la llegada en el tiempo de las ondas P y de las ondas S. Dado que la velocidad de propagación de las dos ondas es diferente, siendo mayor la de la onda P; utilizando la diferencia en tiempo entre llegadas de las dos ondas, es posible determinar la distancia a que ocurrió el sismo. Conociendo los sismogramas de varias estaciones es posible localizar el hipocentro del sismo con base en las distancias determinadas de los tiempos entre llegadas de las ondas.

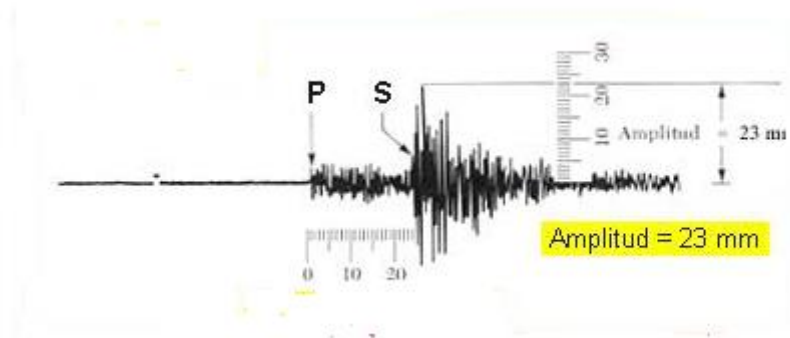


Fig. 4 Sismograma

2.2.1.7 MAGNITUD DEL SISMO

La magnitud del sismo es una medida de la energía liberada por él. Es una medición instrumental y se calcula a partir del sismograma. Fue definida por C. Richter en 1935 de ahí su nombre de magnitud de Richter. Su definición original era para sismos locales, o cercanos, como el logaritmo en base 10 de la amplitud de la máxima onda sísmica, expresada en milésimos de milímetro, registrada en un sismógrafo.

La práctica actual en los observatorios sismológicos es utilizar dos procedimientos para el cálculo de la magnitud, los cuales difieren de la definición original de Richter. La necesidad de disponer de dos escalas proviene del hecho de que los temblores profundos producen sismograma de tipología diferente a los de sismos superficiales.

En general los sismogramas de temblores profundos no manifiestan trenes de ondas superficiales mientras que estos si se manifiestan en un sismograma de un temblor superficial. Dado que en ambos tipos de sismos se presenta ondas P la magnitud se evalúa utilizando estas ondas y se conoce con el nombre de magnitud de onda de cuerpo o magnitud de onda P. El periodo de vibración al cual se realiza la medición de la magnitud de onda de cuerpo es generalmente de 1s, dado que la mayoría de los instrumentos de la red sismológica mundial son sismógrafos de periodo corto del orden de un segundo.

En los sismos superficiales el sismograma generalmente presente trenes de ondas de superficie por lo tanto es práctica común utilizar la amplitud máxima dentro del tren de ondas superficiales. La magnitud calculada de esta manera se llama magnitud de ondas de superficie (M_s). Existen correlaciones locales que permiten convertir la magnitud de una escala a otra, las cuales provienen de aquellos casos en que es posible definir las dos, debido a que se presentan ondas de superficie en el sismograma. En general los valores m_b obtenidos para el mismo sismo son

menores que los valores de M_s . Existen además otras definiciones de magnitud, como puede ser la magnitud de momento sísmico (M_w) la cual se evalúa utilizando el momento sísmico que se calcula multiplicando la rigidez de la roca por el área de fallamiento y por el desplazamiento en la falla, lo cual tiene unidades de momento (fuerza por distancia).

La energía liberada por el sismo se ha correlacionado con la magnitud por medio de la siguiente ecuación:

$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5M_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

Con la energía E expresada en Joules. Esto indica que por cada cambio de una unidad en la magnitud la energía liberada aumenta en $10^{1.5} = 32$ joules por lo tanto un sismo de magnitud 8 libera aproximadamente 32 veces la energía de un sismo de magnitud 7. Desde el punto de vista de los efectos del sismo en las estructura, se considera que una magnitud 5 es el límite inferior de los sismos que causan daños.

La intensidad de un sismo es por otro lado una medida totalmente subjetiva de los efectos que el sismo causa en un lugar determinado, la cual se realiza por medio de observadores, que se desplazan a las diferentes zonas afectadas por el sismo y allí asignan la intensidad para cada sitio, de acuerdo con los efectos observados. Por lo tanto no es una medida única para un sismo, dado que el efecto producido en diferentes lugares por el sismo es distinto y que en la medida que el lugar se encuentre más alejado

de la zona epicentral menores serán los efectos. La escala más utilizada en el ámbito mundial para describirla es la escala de intensidades de mercalli modificada.

Una vez determinado la intensidad en diferentes lugares, es posible definir un mapa de isosistas en el cual se dibujan contornos de áreas afectadas por la misma intensidad.

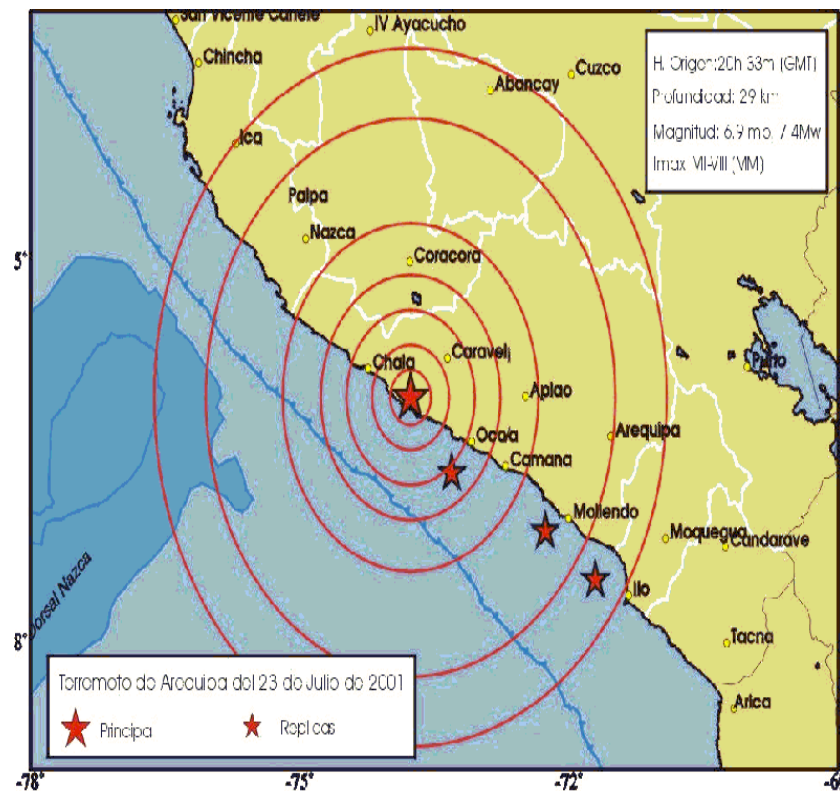


Fig. 5 Mapa isostático sismo de Arequipa 23 de junio 2001

Rutinariamente estos mapas se evalúan con posterioridad a la ocurrencia de sismos importantes.

2.2.2 ACELEROGRAMAS

Para efectos de ingeniería la información producida por los sismograma tiene poco interés fuera de su utilización en estudios de amenaza sísmica, pues permiten definir la localización y magnitud de los eventos sísmicos que

se incluyen en los catálogos. Por esta razón se desarrolló otro tipo de instrumento llamado acelerógrafos de movimiento fuerte.

En general el acelerógrafo consta de una serie de componentes dentro de los que se cuentan: un disipador que activa el instrumento al detectar que está ocurriendo un movimiento con aceleraciones mayores de un valor determinado o umbral de disparo, un grupo de tres péndulos, ya sea fotográfico o digital y por ultimo un reloj que marca de una manera precisa el tiempo que transcurre durante el registro de la señal. A diferencia de los sismógrafos, los acelerógrafos están diseñados para registrar aceleraciones muy altas. Por tal razón son los instrumentos adecuados para registrar las aceleraciones del terreno durante la ocurrencia de un sismo fuerte.

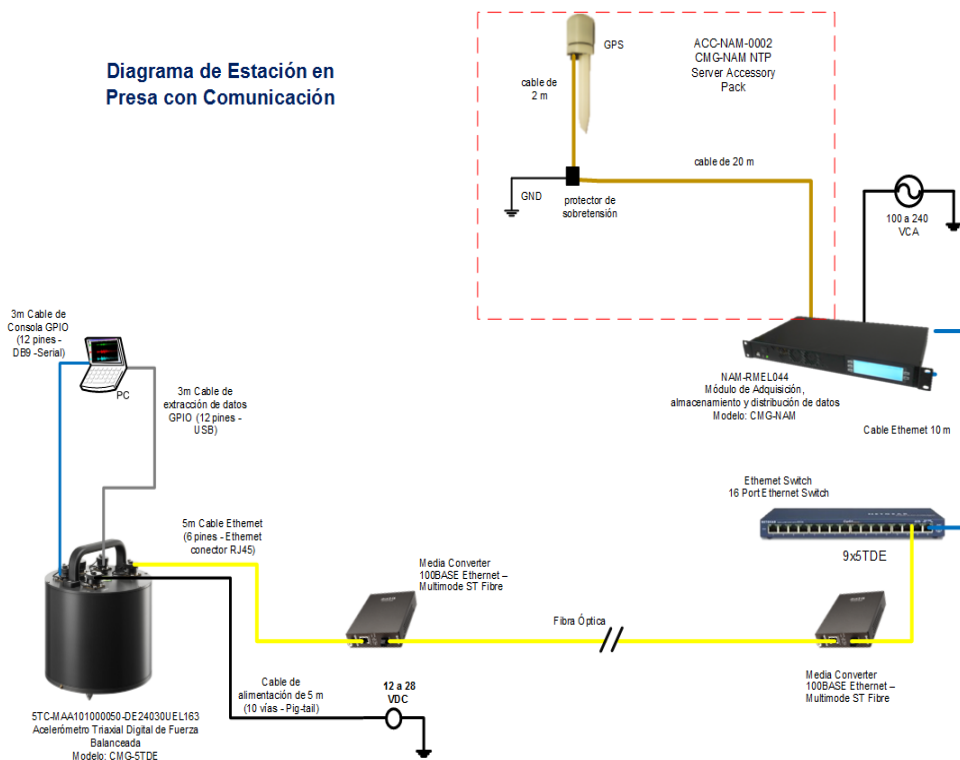


Fig. 6 Estación de un acelerógrafo

2.2.2.1 REGISTROS ACELEROGRAFICOS

El registro obtenido por el acelerógrafo se denomina acelerograma y corresponde a los valores de aceleración horizontal del terreno medido en dos direcciones horizontales ortogonales y los valores de la aceleración vertical. El acelerograma se digitaliza cuando se registra en papel fotográfico y se corrige para una serie de errores producidos por la misma digitalización así como para tener en cuenta el hecho de que se pierde parte de la información inicial mientras el mecanismo de disparo del acelerógrafo activa su funcionamiento.

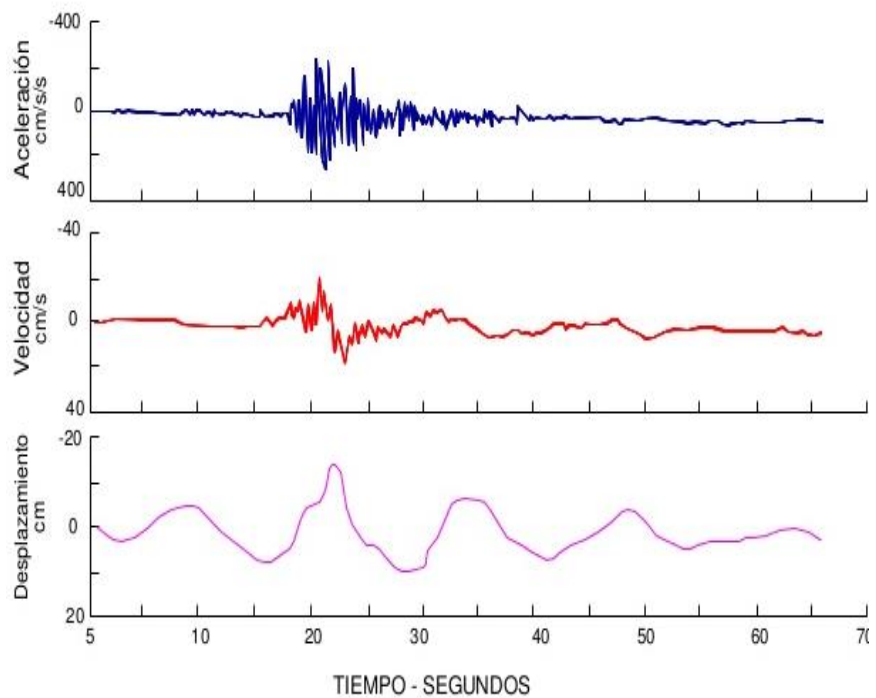


Fig. 7 Aceleración, velocidad y desplazamiento corregidos sismo 17/10/1966 Lima-Perú Instituto geofísico del peru componente, N08E Valores Pico: Acel: 263.3 cm/s², Veloc: 21.60cm/s, Despl:-16.60cm

2.2.2.2 DEFINICIÓN DE LOS MOVIMIENTOS MÁXIMOS DEL TERRENO

Si un acelerograma se integra contra el tiempo, se obtiene el registro de las velocidades que describió el terreno durante el sismo; y si se integra nuevamente se determina los desplazamientos del terreno.

El efecto de los sismos se ve influenciado enormemente por las características locales del suelo, en la zona afectada. Dentro de estos efectos se cuentan grandes avalanchas o desplazamientos. En aquellos casos en los cuales el suelo consiste en material granular suelto, el movimiento cíclico del sismo tiende a compararlo, lo cual conduce al desarrollo de exceso de presión de poros lo cual, a su vez, puede causar licuación del suelo.

Por otro lado, desde hace mucho tiempo se sabe que la estratigrafía del suelo en el lugar tiene una influencia importante en los daños observados. Solo en la medida que se tuvo mayor cantidad de acelerógrafos en lugares cercanos al epicentro, fue posible observar las variaciones en los acelerogramas, dependiendo de las condiciones del suelo subyacente en el sitio del acelerógrafo. La rigidez del suelo y sus características de amortiguamiento, así como la magnitud del sismo y su distancia hipocentral, tienen gran influencia. Un caso clásico de este tipo de fenómenos es la enorme amplificación de las ondas sísmicas en el valle donde se encuentra localizada la ciudad de México, en el registro del 19 de septiembre de 1985.

Las variaciones que se presentan, a partir de los movimientos registros en roca, consisten en una amplificación de las ondas sísmicas con frecuencias de vibración similares a las dominantes del depósito de suelo; un aumento en la duración del sismo y un aumento de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos observados.

La variación de la intensidad de los movimientos sísmicos con respecto a la distancia del lugar al sitio donde se inició la liberación de la energía ha sido estudiada por muchos años. En general el tratamiento inicial que se le dio estuvo basado en mapas de isosistas. En la medida que aumentó la cantidad de instrumentos en diferentes regiones del mundo, se obtuvieron registros acelerograficos que permitieron realizar correlaciones entre alguno de los parámetros de movimiento máximo de terreno, con respecto a la distancia máxima recorrida por las ondas sísmicas. Estas correlaciones se ajustan con respecto a la magnitud del sismo. La definición de la distancia es de gran importancia, pues hay necesidad de distinguir entre la distancia epicentral, la distancia hipocentral y la menor distancia a la falla que causo el sismo.

Las relaciones de atenuación, en general tiene la forma:

$$a = c_1 e^{c_2 m} (r + c_3)^{-c_4}$$

Donde a es la aceleración máxima horizontal del acelerograma, en cm/s^2 ; m es la magnitud M_s del sismo; r es la distancia más cercana a la falla que genera el sismo en km , y c_1 a c_4 son constantes obtenidas por medio de regresiones.

2.2.2.3 TIPOS DE TEMBLORES SEGÚN ACELEROGRAMA

Los registros acelerograficos, varían para eventos producidos por diferentes fuentes sísmicas, e inclusive para sismos producidos por la misma falla. Un ejemplo de esto es el caso de “El centro” en California, allí se tiene registros acelerográficos de eventos ocurridos en 1934, 1940 y 1979.

Newmark y Rosenblueth, clasifican los temblores de la siguiente manera, según sus acelerogramas:

TIPO 1.- El acelerograma prácticamente consiste en un pulso único. Registros de este tipo solo se obtienen a distancias cercanas al epicentro, solo en terreno firme, y únicamente durante sismos superficiales. Cuando estas condiciones no se cumplen, las múltiples reflexiones y difracciones de las ondas sísmicas cambian la naturaleza del movimiento. Excita periodos de vibración cortos, del orden de 0.2 segundos.

TIPO 2.- Esta representados por un movimiento extremadamente irregular de duración moderada. El sismo de “El Centro” de 1940, es el ejemplo clásico de este tipo de registro. Está asociado con distancias focales moderadas y ocurren únicamente en suelos firmes. La mayoría de los sismos que se genera en el anillo circunpacifico son de este tipo. Excitan un amplio rango de periodos de

vibraciones (con un mínimo entre 0.05 y 0.5 segundos y un máximo entre 2.5 y 6 segundos).

Generalmente tienen la misma forma en las tres direcciones principales.

TIPO 3.- Un movimiento del terreno de mucha duración y que manifiesta periodos de vibración muy definidos. Esta la consecuencia de sismos de los tipos anteriores que son filtrados a través de estratos del suelo blando, en los cuales las ondas sísmicas sufren reflexiones sucesivas en las fronteras entre estratos.

TIPO 4.- Este tipo de movimiento comprende aquellos caos en los cuales se presentan deformaciones permanentes a gran escala del terreno. En los lugares de interés se puede presentar licuación o grandes desplazamientos. El temblor de Alaska de 1964 es un ejemplo clásico de este tipo de movimientos, así como el temblor de Nigata, Japon del mismo año.

Esta clasificación de sismos fue postulada hace más de 25 años, y sigue siendo vigente, Newmark y Rosenblueth planteaban que las técnicas analíticas prevalecientes en este entonces permitirían el estudio de los primeros tres tipos de registros, quejándose de la falta de registros del primer tipo.

2.2.2.4 ESTUDIOS DE AMENAZA SÍSMICA

En la actualidad existen diversas tipologías de estudios de amenazas sísmicas, dependiendo del fin para lo cual se realizan. Un tipo de estudios de amenaza sísmica dependiendo del fin para lo cual se realizan. Un tipo de estudios de amenaza sísmica, son aquellos que se realiza para obras de gran importancia, cuya falla debido a un sismo puede ser catastrófica, y que se realizan para fijar parámetros de diseño, los cuales solo son utilizables para diseños de la obra propuesta. Otro tipo corresponde aquellos que se realizan dentro del contexto de una reglamentación de construcción sismoresistente, con el fin de fijar parámetros comparativos dentro de un territorio de aplicabilidad de la norma, conduciendo a mapas de zonificación sísmica. Un tercer tipo corresponde a los estudios de microzonificación, en los cuales una ciudad, o una región relativamente pequeña, se estudia con respecto a la respuesta sísmica esperada en diferentes lugares, agrupando en micro zonas aquellos sitios que tienen características similares.

2.2.3 ACELERACIÓN SÍSMICA

La aceleración sísmica es una medida utilizada en terremotos que consiste en una medición directa de las aceleraciones que sufre la superficie del suelo. Es una medida muy importante en ingeniería sísmica. Normalmente la unidad de aceleración utilizada es la intensidad del campo gravitatorio ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

La aceleración sísmica es la medida de un terremoto más utilizada en ingeniería, y es el valor utilizado para establecer normativas sísmicas y

zonas de riesgo sísmico. Durante un terremoto, el daño en los edificios y las infraestructuras está íntimamente relacionado con la velocidad y la aceleración sísmica, y no con la magnitud del temblor. En terremotos moderados, la aceleración es un indicador preciso del daño, mientras que en terremotos muy severos la velocidad sísmica adquiere una mayor importancia.

2.2.3.1 CORRELACIÓN CON LA ESCALA MERCALLI

La escala de Mercalli mide la intensidad de un terremoto según los daños que produce. Esta escala es directamente relacionable con la intensidad.

Tabla. 3 Correlación con la escala mercalli

ESCALA MERCALLI	ACELERACION SISMICA (g)	VELOCIDAD SISMICA	PERCEPCION DEL TEMBLOR	POTENCIAL DE DAÑO
I	<0.0017	<0.1	No	Ninguno
II-III	0.0017-0.14	0.1-1.1	Muy leve	Ninguno
IV	0.014-0.039	1.1-3.4	Leve	Ninguno
V	0.039-0.092	3.4-8.1	Moderado	Muy leve
VI	0.092-0.18	8.1-16	Fuerte	Leve
VII	0.18-0.34	16-31	Muy fuerte	Moderado
VIII	0.34-0.65	31-60	Severo	Moderado
IX	0.65-1.24	60-116	Violento	Fuerte
X	>1.24	>116	Extremo	Muy

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4 SISTEMAS DINÁMICOS DE UN GRADO DE LIBERTAD

2.2.4.1 VIBRACIÓN LIBRE NO AMORTIGUADA

En la figura se muestra un sistema elástico de un grado de libertad compuesto por una masa m , la cual puede deslizar sin fricción sobre una superficie horizontal y cuya posición se describe por

medio de la coordenada x , y por un resorte que conecta la masa con un apoyo inmóvil. (Garcia Reyes, 1998)

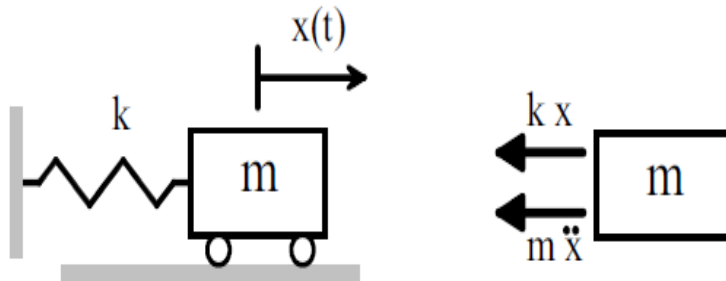


Fig. 8 Sistema elástico de primer orden

$$F_r = kx \quad \dots\dots\dots(2)$$

Dónde:

F_r = Fuerza ejercida por el resorte (N)

k = rigidez del resorte (N/m)

x = desplazamiento relativo entre los dos extremos del resorte (m).

La fuerza inercial que se tiene en la masa m debido a la aceleración a , está dada según la segunda ley de newton.

$$F_i = -m \ddot{x} \quad \dots\dots\dots(3)$$

Donde

F_i = fuerza inercial que obra sobre la masa (N)

M = masa (kg)

\ddot{x} = aceleración de la masa (m/s²)

Esta fuerza inercial obra en la dirección contraria a la dirección de la aceleración, aplicando el procedimiento de “cuerpo libre” en la masa.

$$F_r - F_i = kx + m\ddot{x} = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

Así se obtiene la siguiente ecuación de equilibrio, correspondiente a una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

Dividiendo por m y llamando ω^2 la constante k/m, se obtiene:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

Y la solución de esta ecuación diferencial es:

$$x(t) = A\sin(\omega t) + B\cos(\omega t) \quad \dots\dots\dots(7)$$

Donde A y B dependen de las condiciones iniciales que indujeron el movimiento. Por lo tanto, si se define x_0 como el desplazamiento que tenía la masa en el momento $t=0$ y v_0 como su velocidad también en el tiempo $t=0$, se obtiene:

$$x_0 = A\sin(\omega 0) + B\cos(\omega 0) = B \quad \dots\dots\dots(8)$$

Derivando la ecuación

$$\dot{x} = A\omega\cos(\omega t) - B\omega\sin(\omega t) \quad \dots\dots\dots(9)$$

Al tiempo $t=0$ es igual a:

$$v_o = A\omega \cos(\omega 0) - B\omega \sin(\omega 0) = A\omega \dots\dots\dots(10)$$

Entonces,

$$A = \frac{v_o}{\omega} \dots\dots\dots(11)$$

P

$$x(t) = \left(\frac{v_o}{\omega}\right) \sin(\omega t) + x_o \cos(\omega t) \dots\dots\dots(12)$$

r

lo tanto la solución de la ecuación se convierte en:

Dónde:

v_o = velocidad de la masa en el instante $t=0$ (m/s)

x_o = desplazamiento de la masa en el instante $t=0$ (m)

ω = frecuencia natural del sistema (rad/s)

El haber introducido un desplazamiento y una velocidad iniciales a la masa hace que esta oscile con un movimiento periódico a partir del momento ($t=0$) en que se introdujeron estas condiciones iniciales. (Garcia Reyes, 1998)

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ = frecuencia natural del sistema en radianes por segundo (rad/s).

$f = \frac{\omega}{2\pi}$ = frecuencia natural del sistema en ciclos por segundo o hertz (Hz).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} = \text{periodo natural del sistema en segundos (s)}.$$

2.2.4.2 VIBRACIÓN LIBRE AMORTIGUADA

Los movimientos oscilatorios tienden a disminuir con el tiempo hasta desaparecer. Esto se debe al amortiguamiento que se presenta, el cual hace que parte de la energía se disipe. Las causas de este amortiguamiento están asociadas con diferentes fenómenos dentro de los cuales se puede contar con la fricción de la masa sobre la superficie de apoyo, el efecto del aire que rodea la masa, el cual tiende a impedir que ocurra el movimiento, la no linealidad del material del resorte, entre otros.

Existen numerosas maneras de describir matemáticamente el efecto de fricción. Dentro de estos modelos, uno de los más utilizados es el que se conoce como amortiguamiento viscoso. El amortiguamiento viscoso la fuerza de amortiguamiento es directamente proporcional a la velocidad relativa entre los extremos del amortiguador, lo cual se puede describir por medio de la siguiente ecuación:

$$F_a = c \dot{x} \dots\dots\dots(13)$$

Donde

F_a = fuerza producida por el amortiguamiento (N)

C = constante de amortiguamiento (N.s/m)

\dot{x} = velocidad relativa entre los dos extremos del amortiguador (m/s).

En la figura se muestra un sistema lineal amortiguado de un grado de libertad. El grado de libertad esta descrito por la ordenada x , la cual indica la posición de la masa m . a esta masa, colocada sobre una superficie sin fricción, están conectados un resorte con constante de rigidez k y un amortiguador cuya constante es c .

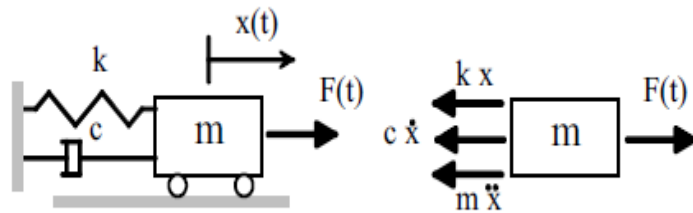


Fig. 9 Sistema lineal amortiguado de un grado de libertad

De la aplicación del procedimiento de cuerpo libre sobre la masa, se obtienen las tres fuerzas que obran sobre ella, correspondientes a la fuerza del resorte F_r .

Utilizando el principio de D'Alembert puede plantearse la siguiente ecuación:

$$F_r + F_a - F_i = 0 \quad \dots\dots\dots(14)$$

Y al reemplazar las definiciones de las diferentes fuerzas:

$$kx + c \dot{x} - (-m \ddot{x}) = 0 \quad \dots\dots\dots(15)$$

Lo cual conduce a la siguiente ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden.

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \quad \dots\dots\dots(16)$$

La ecuación característica de la ecuación anterior es:

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad \dots\dots\dots(17)$$

Cuyas raíces son:

$$\lambda = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad \dots\dots\dots(18)$$

O sea

$$\lambda_1 = \frac{-c - \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

Y

$$\lambda_2 = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

Por lo tanto la solución de la ecuación diferencial de equilibrio del sistema es:

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \quad \dots\dots\dots(19)$$

Dónde:

A=constante que depende de las condiciones iniciales del movimiento.

B=constante que depende de las condiciones iniciales del movimiento

e= base de los logaritmos neperianos.

Existen tres casos de solución para la ecuación anterior dependiendo del valor del valor del radical de la ecuación, los cuales se presentan a continuación.

2.2.4.3 AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO

Cuando la radical de la ecuación es igual a cero la cantidad de amortiguamiento c , se denomina amortiguamiento crítico y se define c_c y se obtiene así:

$$c_c^2 - 4mk = 0 \quad \dots\dots\dots(20)$$

Por lo tanto;

$$c_c = 2\sqrt{mk} = 2\sqrt{mk(m/m)} = 2m\omega \quad \dots\dots\dots(21)$$

Definiendo ξ como el coeficiente de amortiguamiento crítico,

igual al cociente c/c_{cl} entonces:

$$c = 2\xi m\omega \quad \dots\dots\dots(22)$$

Que al reemplazar en las ecuaciones se obtiene:

$$\lambda_1 = \left[-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \right] \omega \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$\lambda_2 = \left[-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1} \right] \omega \quad \dots\dots\dots(24)$$

Ahora los tres casos de interés se han convertido en $\xi = 1$, $\xi > 1$, $\xi < 1$, que se denominan amortiguamiento igual, mayor y menor del crítico, respectivamente.

Para el caso de amortiguamiento igual al crítico ($\xi = 1$):

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -\omega \quad \dots\dots\dots(25)$$

Debido a la raíz la solución para el movimiento x , es del tipo:

$$x(t) = Ae^{-\omega t} + Bte^{-\omega t} \quad \dots\dots\dots(26)$$

Reemplazando las condiciones iniciales se obtiene:

$$x(t) = [x_o + t(v_o + x_o \omega)] e^{-\omega t} \dots\dots\dots(27)$$

2.2.4.4 AMORTIGUAMIENTO MAYOR QUE EL CRÍTICO

En este caso $\xi > 1$. Tomando los valores λ_1 y λ_2 de las ecuaciones

$$x(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t} \dots\dots\dots(28)$$

Se obtiene:

$$x(t) = e^{-\xi \omega t} \left[Ae^{\sqrt{\xi^2 - 1} \omega t} + Be^{-\sqrt{\xi^2 - 1} \omega t} \right] \dots\dots\dots(29)$$

A y B son constantes arbitrarias que dependen de las condiciones iniciales. En este caso el movimiento también es aperiódico como el caso de amortiguamiento crítico, con la diferencia que el movimiento decrece más lentamente que cuando tiene amortiguamiento igual al crítico (Garcia Reyes, 1998).

2.2.4.5 AMORTIGUAMIENTO MENOR QUE EL CRÍTICO

Corresponde a la posibilidad de mayor interés por cuanto se presenta vibración. La gran mayoría de aplicaciones prácticas en vibraciones están regidas por este caso debido al hecho de que la gran mayoría de los sistemas estructurales tienen valores de amortiguamiento bajos. En este caso $\xi < 1$. Tomando los valores de λ_1 y λ_2 de las ecuaciones 29 puede verse que la parte interna de los radicales es negativa, por lo tanto la solución es imaginaria (Garcia Reyes, 1998):

$$x(t) = e^{-\xi \omega t} \left[Ae^{i\sqrt{1-\xi^2} \omega t} + Be^{-i\sqrt{1-\xi^2} \omega t} \right] \dots\dots\dots(30)$$

Aplicando la transformada de Euler, la cual se expresa como:

$$e^{iy} = \cos(y) + i\text{sen}(y) \dots\dots\dots(31)$$

Y

$$e^{-iy} = \cos(y) - i\text{sen}(y) \dots\dots\dots(32)$$

Se obtiene una forma no imaginaria de la ecuación:

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} \left[C \cos(\sqrt{1-\xi^2}\omega t) + D\text{sen}(\sqrt{1-\xi^2}\omega t) \right] \dots\dots\dots(33)$$

Al resolver las constantes C y D para las condiciones iniciales de desplazamiento inicial X_0 y la velocidad V_0 se obtiene:

$$x(t) = e^{-\xi\omega t} \left[X_0 \cos(\omega_a t) + \left(\frac{V_0 + \xi X_0 \omega}{\omega_a} \right) \text{sen}(\omega_a t) \right] \dots\dots\dots(34)$$

Donde ω_a se conoce como la frecuencia amortiguada y está definida por:

$$\omega_a = \sqrt{1-\xi^2}\omega \dots\dots\dots(35)$$

El movimiento disminuye de amplitud exponencialmente. La porción oscilatoria tiene un periodo un poco mayor que el que tendría un sistema no amortiguado con la misma rigidez y masa:

$$T_a = \frac{2\pi}{\omega_a} = \frac{2\pi}{\sqrt{1-\xi^2}\omega} \dots\dots\dots(36)$$

2.2.5 ESPECTRO DE RESPUESTA

2.2.5.1 SEÑALES Y SISTEMAS

Una señal es una variable física que contiene o transporta información. Algunos tipos de señales son: tensión, sonido, imagen, temperatura captada por un sensor, movimiento, etc. Nos interesan especialmente las señales que varían en el tiempo. No todas las señales varían en el tiempo.

Las señales variables en el tiempo pueden representarse mediante una función del tiempo $y(t)$. Estas señales pueden ser de dos tipos: continuas o discretas.

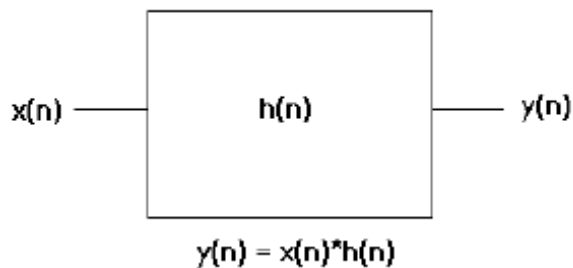


Fig. 10 Modelo de un sistema

Un sistema es un conjunto interconectado de elementos que procesan una señal. Se caracteriza por tener una o más entradas y una o más salidas. En un sistema lineal se cumple el principio de superposición. Muchos sistemas lineales pueden ser descritos por ecuaciones diferenciales. Todo su sistema está caracterizado por su “función de transferencia”, que viene a ser la respuesta del sistema cuando la entrada es un impulso unitario. En forma matemática, la salida del sistema será igual a la convolución de la señal de entrada por la función de transferencia del sistema.

$$y(n) = x(n) * h(n) \dots\dots\dots(37)$$

Si $x(n) = \delta(n)$ entonces:

$$y(n) = \delta(n) * h(n) = h(n) \dots\dots\dots(38)$$

$h(n)$: Respuesta impulsional

El procesamiento digital de señales implica haber expresado previamente la magnitud de la señal en forma numérica. Cada número, así obtenido, representa la magnitud de la señal en un instante determinado. Entonces, tendremos una sucesión de muestras de la señal en lugar de la señal completa. Reemplazaremos así la señal continua por la señal continua por la señal discreta, en la cual solo interesan los valores en instantes discretos. En la práctica el muestreo se logra multiplicando la señal continua por un tren de impulsos unitarios.

El teorema del muestreo establece que si una señal se muestrea de manera que se cumpla la condición Nyquist ($W_s > 2w_m$), es decir, que la frecuencia de muestreo tiene que ser mayor que la máxima frecuencia de muestreo tiene que ser mayor que la máxima frecuencia contenida en la señal, entonces es posible recuperar la señal.

Generalmente, las señales sísmicas contienen componentes de frecuencia de 1 a 10Hz, por lo que la frecuencia de muestreo es de 20Hz como mínimo.

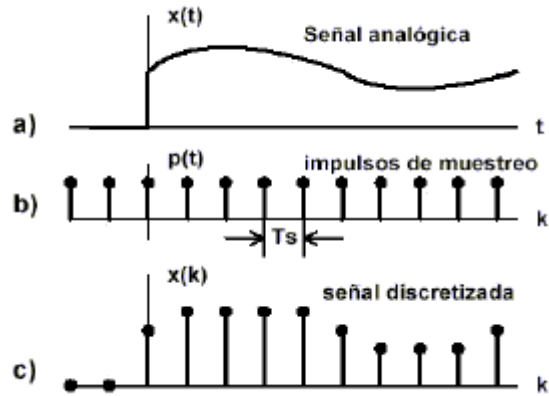


Fig. 11 Proceso de muestreo

2.2.5.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

Aun cuando los resultados de una medición hayan sido reducidos y graficados. Las características de interés pueden no ser obvias. Si es así, será necesario un procesamiento que permita mejorar las características buscadas.

2.2.5.3 ANÁLISIS DE FOURIER

Una senoide tiene la forma matemática descrita por una curva seno por lo tanto;

$$y = a \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi x}{L} \right] \dots\dots\dots(39)$$

Donde x es la distancia a lo largo de perfil. Entonces con esta ecuación podremos calcular el valor de desplazamiento y para cualquier distancia. Cuando x sea cero, el desplazamiento y también será cero. Cuando x aumenta, y aumenta hasta un máximo en $x = \frac{\lambda}{4}$, luego disminuye, siendo cero en $x = \frac{\lambda}{2}$, y

continua decreciendo hasta un mínimo de $-a$ en $x = \frac{3\lambda}{4}$,

volviendo a aumentar para alcanzar cero $x = \lambda$.

Una serie armónica consta de varias sinusoides, cada una con un número exacto de medias longitudes de onda L de la señal, es

decir $\frac{\lambda}{2} = L$, $\frac{3\lambda}{2} = L$, $\lambda = L$, $2\lambda = L$, etc. Entonces,

$$y = a_0 + a_1 \text{sen} \left[2\pi \left(\frac{x}{2L} \right) \right] + a_2 \text{sen} \left[2\pi \left(\frac{2x}{2L} \right) \right] + a_3 \text{sen} \left[2\pi \left(\frac{3x}{2L} \right) \right] + k \quad .(40)$$

Entonces sus longitudes de onda serán $2L$, L , $2L/3$, $L/2$, etc. Esta suma es la señal en la serie de Fourier, la cual se construye dando un valor particular a la amplitud de cada armónica. por lo tanto la serie se obtiene reemplazando λ por $2L$, L , etc. y dando diferentes valores a a_1 , a_2 , a_3 , etc.; a_0 es un término extra usado para ajustar subiendo o bajando la totalidad de la curva; y es la suma de la serie y da el valor de la señal para cualquier valor de x .

Esto se aplica para señales que varían en el tiempo. Las ecuaciones pueden ser convertidas reemplazando cada valor espacial por el correspondiente valor temporal.

Valores espaciales

L: Longitud de onda

X: Distancia a lo largo de la señal

λ : Longitud de onda

Valores temporales

T: Duración de la señal

t: tiempo desde el comienzo de la señal

τ : Periodo de la armónica = 1/frecuencia

τ es el tiempo que toma una oscilación en un lugar para completar un ciclo, es decir, el tiempo entre dos crestas. Sin embargo, es más conveniente usar la frecuencia f , de modo que.

$$y = a \operatorname{sen}(2\pi ft) \dots\dots\dots(41)$$

Para encontrar los valores de las amplitudes de la señal se utilizan las siguientes expresiones:

$$a_o = \left(\frac{1}{L}\right) \int_0^L y dx \text{ o } a_o = \left(\frac{1}{L}\right) \int_0^T y dt \text{ (valor medio de la señal).}$$

$$a_n = \left(\frac{2}{L}\right) \int_0^L y \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \text{ o } \left(\frac{2}{L}\right) \int_0^T y \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{T}\right) dt \dots\dots\dots(42)$$

2.2.6 SISTEMAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Las técnicas convencionales empleadas en la actualidad en las distintas normativas de diseño sismo resistente se basan en la experimentación y el estudio del daño estructural producido por terremotos.

Tal como se ha visto, la ductilidad y el hiperestatismo o redundancia estructural constituyen la base de los criterios actuales de diseño, permitiendo reducir las fuerzas sísmicas significativamente con el objetivo de proyectar estructuras económicas que se comporten satisfactoriamente ante un eventual sismos severos. La ductilidad, sin embargo, significa daño en los elementos estructurales y, en muchos casos, incluso daño significativo que origina el cierre por lo menos temporal del edificio.

La disipación de energía en el diseño convencional se concentra en los nudos de unión de vigas y columnas, donde el comportamiento inelástico conduce a daños estructurales. A pesar que las secciones sean específicamente diseñadas, el comportamiento histórico finalmente se degrada y con ello la disipación.

Por ello en los últimos años se ha concentrado y experimentado técnicas que reducen la fuerza sísmica a fin de evitar el daño en la estructura, o que los localice en determinados puntos. Una tendencia moderna de diseño es buscar sistemas estructurales que localicen las demandas de ductilidad en determinadas puntos “débiles”, que disipen la energía de forma estable y que, además sean reparables.

El objetivo de control de vibraciones posee dos aspectos importantes a considerar;

Hacer que los periodos naturales de vibración sean muy diferentes de los periodos predominantes de la excitación sísmica, con el objeto de evitar el fenómeno de la resonancia.

Lograr que el amortiguamiento sea alto, y así reducir las deformaciones debidas a la sollicitación sísmica

2.2.6.1 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VIBRACIONES

En esta sección se revisan los sistemas de protección adaptados a las estructuras para mitigar el daño de fuerzas ambientales adversas como los sismos, los vientos y las mareas.

Los sistemas de protección sísmica empleados en la actualidad comprenden desde relativamente simples dispositivos de control pasivo hasta avanzados sistemas completamente activos. Los sistemas pasivos son tal vez los más conocidos e incluyen los sistemas de aislamiento sísmico y los sistemas mecánicos de disipación de energía.

Este último sistema se puede decir que es la continuación del desarrollo de la filosofía de buscar sistemas estructurales que

ubiquen demandas de ductilidad en una forma racional, formando puntos especiales que disipen energía en forma estable que se puedan reparar como son los marcos excéntricos. Los puntos especiales mencionados anteriormente son subsistemas mecánicos que disipan energía y pueden reemplazarse.

La disipación pasiva de energía es una tecnología que mejora el desempeño de una edificación añadiendo amortiguamiento a su estructura, siendo el uso primario de los disipadores de energía la reducción de los desplazamientos sísmicos de la estructura.

La eficacia de estos sistemas depende de la cantidad de dispositivos, su ubicación en el edificio, clase de disipador y adecuado diseño. Estos elementos disipan energía en función de los desplazamientos relativos de entrepiso, que típicamente determinan las deformaciones de los disipadores.

Los disipadores de energía reducen, igualmente la fuerza en la estructura proporcionándole a su vez una respuesta elástica, en algunos casos, sin que deba esperarse la reducción de la fuerza en estructuras que estén respondiendo más allá de la fluencia. En ciertos casos (disipadores de fluido viscoso y polímeros viscoelásticos) la frecuencia de deformación tiene una función significativa en la disipación por deformación cíclica.

En muchos casos la disipación de energía se ha constituido en una alternativa para los esquemas convencionales de rigidización y reforzamiento y se debe esperar que alcancen un nivel de desempeño comparable.

En general estos dispositivos pueden ser una buena opción a considerar en los casos en los cuales se espera un buen nivel de desempeño en cuanto a la protección de la vida de las personas o, quizás, respecto de la ocupación inmediata, pero con aplicabilidad limitada en proyectos con un nivel de desempeño de prevención de colapso.

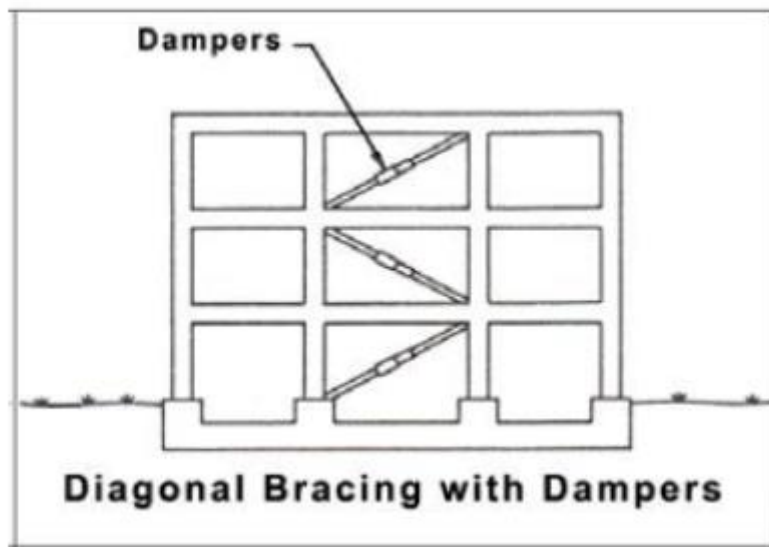


Fig. 12 Ubicación de los sistemas de disipación de energía

2.2.7 SISTEMA DE CONTROL DE LA RESPUESTA DINÁMICA

Cuando se diseñan la mayoría de los edificios y otras civiles, las acciones principales a considerar son aquellas debidas a los efectos gravitacionales. Estas cargas están siempre presentes y deben ser resistidas a través de toda la vida estructural. La magnitud de estas cargas puede ser rápidamente determinada basada en el peso propio y lo requerimientos de ocupación estática es considerada para el diseño de las estructuras. Esta idealización grandemente simplifica el diseño estructural, y de alguna manera permitió a

nuestros ancestros diseñar y construir antes de poseer un desarrollo racional de los principios científicos (Villarreal G, 2009).

Por otra parte, cuando se trabaja con fuerzas laterales, existe una tendencia natural a manejar estas fuerzas con los mismos métodos utilizados para las cargas gravitacionales. Por ejemplo, los vientos y los sismos son frecuentemente idealizados como cargas estáticas “equivalentes” de determinada magnitud que deben ser resistidas por la estructura. Esto ha sentado las bases de varios códigos de diseño desde los inicios del siglo 20 y los resultados han sido bastante satisfactorios en varios casos. Así mismo considerando las características de las cargas horizontales, importantes mejoras pueden ser hechas. Como resultado de este punto de vista dinámico, varias innovaciones para la protección estructural han sido propuestas. Una amplia gama de estrategias consideradas consisten en la incorporación de elementos externos a la estructura para mitigar su respuesta dinámica. La parte de mecánica estructural que maneja estos conceptos es denominada control estructural (Villarreal G, 2009).

El control estructural ante solicitaciones sísmicas se está plantando como una alternativa al diseño sismorresistente convencional. Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de desplazamiento de una estructura haciendo uso de alguno de los siguientes recursos:

Modificación de las propiedades dinámicas del edificio.

Disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos.



Fig. 13 Sistemas de control estructural

Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica y a diferencia del resto de sistemas no precisan de aporte energético para funcionar. Los sistemas activos, semiactivos e híbridos están formados por actuadores de fuerza y/o elementos pasivos, controlador a tiempo real y dispositivos sensores instalados en la estructura (Villarreal G, 2009).

Los sistemas pasivos se clasifican en sistemas de aislamiento de base, de disipación de energía y en osciladores resonantes. Los aisladores de base, situados sobre la cimentación y soportando al edificio, desacoplan parcialmente al edificio del suelo, disminuyendo la energía de entrada y por consiguiente su respuesta estructural. Los disipadores de energía no alteran la energía de entrada, que depende básicamente del periodo fundamental y de la masa del edificio, manifestando su eficiencia maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural. Los sistemas inerciales acoplados tales como el Tuned Mass Dampers (TDM) introducen masas adicionales, normalmente situadas en

la parte alta de los edificios, cuya excitación absorbe parte de la energía cinética introducida por el sismo. Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez, no dependen de fuentes de energía, son mecánicamente simples y su costo es competitivo. Existen actualmente cientos de edificios construidos en el mundo con estos sistemas.

Los sistemas activos contrarrestan directamente los efectos del sismo mediante actuadores. La gran demanda de energía que comporta su actuación ante un sismo severo y la complejidad de los algoritmos de control los convierte en sistemas poco robustos. Los sistemas híbridos y semiactivos nacen ante la necesidad de respuesta en una banda amplia de frecuencias y de menor consumo energético. Los sistemas híbridos son muy similares a los sistemas activos, sin embargo en ellos antevienen elementos pasivos que permiten reducir el consumo energético del sistema ante un sismo. Los sistemas semiactivos emplean dispositivos de control pasivo, sin consumo energético, cuyas características resistentes permiten ser modificadas y controladas a tiempo real mediante actuadores de bajo consumo a través de sistemas de control parecidos a los empleados en los sistemas activos e híbridos.

2.2.8 SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL

Las vibraciones estructurales producidas por sismos o viento pueden ser controladas mediante sistemas de control estructural. Estos sistemas son métodos alternos para disminuir las sollicitaciones (fuerzas internas) de una estructura, mejorando sus propiedades dinámicas con base en esquemas de control pasivo, activo semiactivo e híbrido (Villarreal G, 2009):

Control pasivo: Un sistema de control pasivo no requiere una fuente externa de potencia. Los dispositivos de control pasivo producen fuerzas en respuesta al movimiento de la estructura. La energía total en un sistema estructural controlado pasivamente, incluyendo los dispositivos pasivos, no aumenta por dichos dispositivos.

Control activo: Un sistema de control activo requiere de una fuente externa de potencia para alimentar los actuadores que aplican fuerzas a la estructura. Estas fuerzas pueden ser usadas tanto para suministrar como para disipar energía en la estructura. En un sistema de control activo con retroalimentación, las señales enviadas a los actuadores de control son función de las respuestas (normalmente movimientos) de la estructura, medidas con sensores físicos.

Control semiactivo: Los sistemas de control semiactivo son una clase de sistemas de control activo para los que la energía externa requerida es de menor orden de magnitud que para los sistemas convencionales. Normalmente los dispositivos de control semiactivo no suministran energía mecánica al sistema estructural (incluyendo estructura y actuadores) y, por lo tanto, se garantiza la estabilidad tipo entrada-acotada salida-acotada (BIBO). Estos dispositivos frecuentemente son considerados como dispositivos pasivos controlables.

Control híbrido: Los sistemas de control híbrido son sistemas que emplean una combinación de sistemas pasivos y activos. Por ejemplo, una estructura acondicionada con amortiguadores viscoelásticos y un amortiguador activo de masa en la parte superior del edificio; o una estructura aislada en la base con actuadores controlados activamente para mejorar su comportamiento.

2.2.8.1 SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO

Los dispositivos de control activo están compuestos por una masa que se controla activamente por un actuador mediante un algoritmo de control, el cual con la información de los sensores ubicados para medir la respuesta estructural y/o la excitación del edificio, calcula la magnitud y dirección de la fuerza a aplicar por el actuador para contrarrestar los efectos sísmicos.

Se pueden tener tres estructuras de control básicas para los sistemas activos que dependen de la variable medida: i) Cuando solo se miden las variables correspondientes a la respuesta de la estructura, el sistema de control estructural se denomina realimentado, ya que las medidas de la respuesta de la estructura sirven para hacer correcciones continuas de las fuerzas aplicadas por el actuador; ii) cuando se miden las variables de excitación de la estructura, el sistema de control estructural se denomina anticipativo; y iii) cuando se miden las variables de excitación de la estructura y la respuesta de la estructura, el sistema de control estructural se denomina anticipativo-realimentado.

El mérito de los sistemas de control activo es que son efectivos para un rango amplio de frecuencias y también en el transitorio de la vibración. Sin embargo ellos están limitados por la cantidad y disponibilidad de energía para imponer las fuerzas requeridas para controlar la infraestructura civil cuando una fuerza externa actúa sobre esta. En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan numerosas ventajas. Entre ellas: i) mayor

efectividad en el control de la respuesta estructural; ii) efectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del terremoto; iii) puede ser aplicado tanto para terremotos o vientos fuertes; iv) selección de los objetivos de control: lo cual permite enfatizar, por ejemplo, el confort humano sobre aspectos del movimiento estructural en momentos no críticos, e incrementar la seguridad estructural ante una acción dinámica severa. Un dispositivo muy común del control activo, es el amortiguador de masa activa AMD, que utiliza usualmente una masa auxiliar inferior al 1% de la masa total de la estructura con un actuador conectado a ella, y es instalado en una de las últimas plantas del edificio tal como se puede observar en las aplicaciones reales de control activo.

Los sistemas de control activo se pueden clasificar en: aislamiento activo de base; bracing activo, amortiguador activo de columna líquida, absorbente de impactos, múltiples edificios conectados y dispositivos de masa activa. Donde se utilizan diferentes tipos de controladores como PID, Linear Quadratic Regulator, Fuzzy logic, Algoritmos genéticos, Redes Neuronales, para tratar de reducir las respuestas estructurales de diferentes tipos de estructuras civiles, en su mayoría edificios, usando dispositivos de masa activa ante excitaciones de tipo sísmico.

Un sistema de control activo consiste en:

- a) Sensores situados en la propia estructura empleados para medir variables correspondientes a la excitación externa, o variables de la respuesta estructura o de ambos tipos.
- b) Sistemas controladores que se basan en las medidas de los sensores y calculan la fuerza a aplicar por los actuadores para contrarrestar los efectos sísmicos.
- c) Actuadores que habitualmente son alimentados por fuentes de energía externa para ejercer fuerzas.

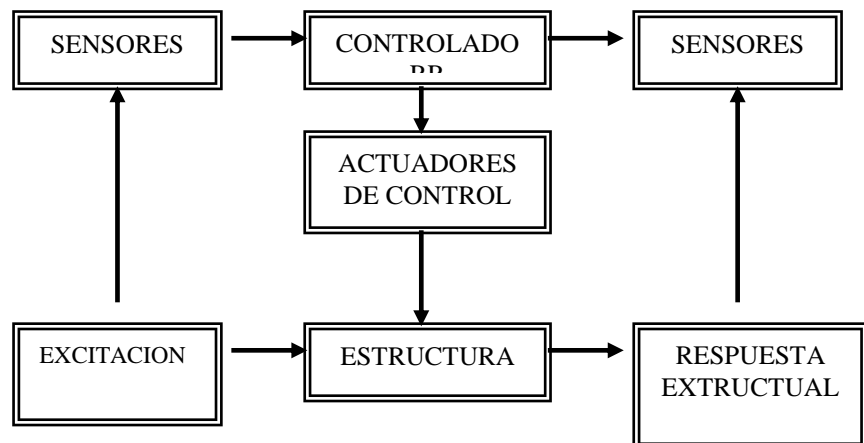


Fig. 14 Esquema de un sistema de control activo

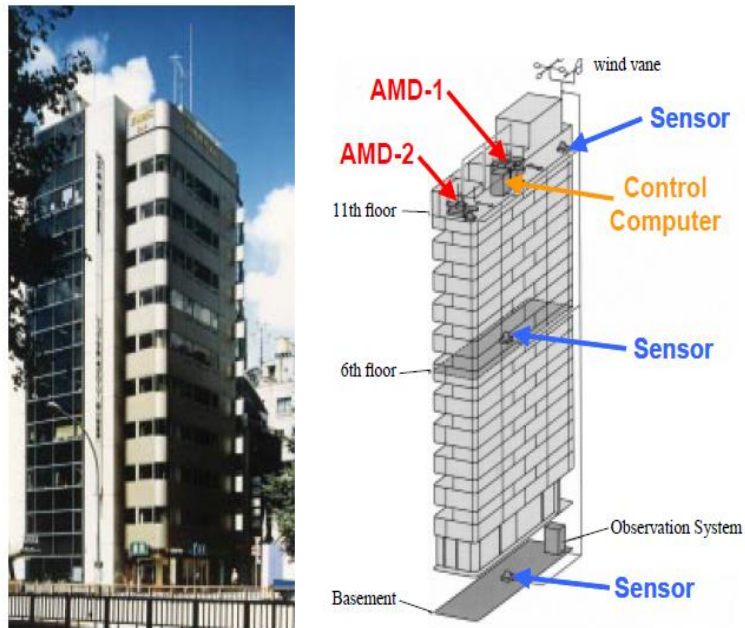


Fig. 15 Aplicación del sistema AMD en edificaciones

En comparación con los sistemas pasivos, los sistemas activos presentan numerosas ventajas.

- Mayor efectividad en control de respuesta estructural.
- Afectividad menos sensible a las condiciones locales del suelo y a las características del sismo.
- Aplicación ante diversos eventos: viento o sismos.
- Selección de los objetos de control.

2.2.9 MODELADO EN EL ESPACIO DE ESTADOS

La tendencia moderna en los sistemas de ingeniería es hacia una mayor complejidad, debido sobre todo a que se requieren tareas más complejas y buena precisión. Los sistemas complejos pueden tener múltiples entradas y múltiples salidas y pueden ser variantes en el tiempo. Debido a la necesidad de cumplir requisitos cada vez más exigentes en el comportamiento de los sistema de control, el aumento en la complejidad del sistema y el fácil

acceso a las computadoras a gran escala, la teoría moderna de control, que es una nueva aproximación al análisis y diseño de los sistemas de control complejo, se ha desarrollado desde 1960. Esta nueva aproximación se basa en el concepto de estado. El concepto de estado por sí mismo no es nuevo, puesto que ha existido por bastante tiempo en el campo de la dinámica clásica y en otros campos (Ogata, 2010).

2.2.9.1 TEORÍA DEL CONTROL MODERNO FRENTE A TEORÍA DE CONTROL CONVENCIONAL

La tendencia de control moderna contrasta con la teoría de control convencional en que su formulación es aplicable a sistemas de múltiples - entradas, múltiples - salidas, que pueden ser lineales o no lineales, invariantes en el tiempo o variables en el tiempo, mientras que la teoría convencional solo es aplicable a sistemas de una entrada- una salida invariantes en el tiempo. Además, la teoría de control moderna es esencialmente una aproximación en el dominio temporal, mientras que la teoría de control convencional es una aproximación en el dominio de la frecuencia compleja (Ogata, 2010).

ESTADO. El estado de un sistema dinámico es el conjunto de variables más pequeño (llamadas variables de estado), de forma que el conocimiento de estas variables en $t = t_0$, junto con el conocimiento de la entrada para $t \geq t_0$, determinan completamente el comportamiento del sistema en cualquier $t \geq t_0$.

El concepto de estado no está limitado a sistemas físicos. Es aplicable a sistemas biológicos, sistemas económicos, sistemas sociales y otros.

VARIABLES DE ESTADO. Las variables de un sistema dinámico son las variables que constituyen el menor conjunto de variables que determina tal estado del sistema dinámico. Si al menos se necesitan n variables $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ para describir completamente el comportamiento de un sistema dinámico (de forma que una vez que la entrada para $t \geq t_0$ esta dada y el estado inicial en $t = t_0$ esta especificado, el estado futuro del sistema determinado completamente), entonces tales n variables son un conjunto de variables de estado (Ogata, 2010).

Las variables de estado no necesitan ser físicamente medibles o cantidades observables. Se pueden seleccionar como variables de estado variable que no representan cantidades físicas y aquellas que no son medibles ni observables. Tal libertad en la elección de las variables de estado es una ventaja de los métodos en el espacio de estados. Sin embargo, prácticamente es conveniente seleccionar para las variables de estado cantidades físicamente medibles si esto es posible, porque las leyes de control óptimo requerirán realimentar todas las variables de estado con una ponderación adecuada.

VECTOR DE ESTADO. Si se necesitan n variables de estado para describir completamente el comportamiento de un sistema dado, entonces esas n variables de estado se pueden considerar

como las n componentes de un vector x . Este vector se denomina vector de estado. Un vector de estado es, por lo tanto, un vector que determina unívocamente el estado del sistema $x(t)$ en cualquier instante del tiempo $t \geq t_0$. Una vez que se conoce el estado en $t = t_0$ y se especifica la entrada $u(t)$ para $t \geq t_0$.

ESPACIO DE ESTADOS. El espacio n - dimensional cuyos ejes de coordenadas están formados por el eje $ejex_1, ejex_2, \dots, ejex_n$, donde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las variables de estado. Se denomina espacio de estados. Cualquier estado se puede representar como un punto en el espacio de estados.

ECUACIONES EN EL ESPACIO DE ESTADOS. En el análisis en el espacio de estados se centra la atención en los tres tipos de variables que aparecen en el modelado de los sistemas dinámicos; las variables de entrada, las variables de salida y las variables de estado.

Sea el polinomio:

$$y^n + a_1 y^{n-1} + a_{n-1} y^0 + a_n y = u$$

u : es la entrada de excitación o forzante.

El conocimiento de las condiciones iniciales $y(0), y^0(0), \dots, y^1(0)$ en conjunto con u determinan en forma total el comportamiento del sistema.

Cualquier sistema cuya dinámica este representado por un modelo matemático de una o más ecuaciones diferenciales puede ser representado por un sistema de ecuaciones diferenciales de primer

orden o una ecuación diferencial lineal de primer orden en términos matriciales (Ogata, 2010).

Si designamos como:

$$x_1 = y$$

$$x_2 = \dot{y}$$

$$x_3 = \ddot{y}$$

$$x_n = y^{(n-1)}$$

Entonces si se deriva las expresiones,

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\dot{x} = x_n$$

$$\dot{x} = a_n x_1 - a_{n-1} x_2 - a_1 x_0 + u$$

La ecuación de estado se define como:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Donde

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \cdot & & & & \\ -a_n & -a_{n-1} & \dots & -a_{n-2} & -a_0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix}$$

Y la salida como,

$$Y = Cx$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \dots\dots\dots 0]$$

En la ecuación

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

X= vector de estado (nx1)

A= matriz de coeficientes del proceso (nxn)

B= matriz de coeficientes del controlador (nxm)

U= todas las entradas del sistema mx1, función forzante y controlante

C= matriz de relación (1xn)

Y(τ)= vector de respuesta (wx1).

2.2.10 TRANSFORMADOR DIFERENCIAL VARIABLE LINEAL (LVDT)

El transformador diferencial variable lineal es un dispositivo de sensado de posición que provee un voltaje de salida de CA proporcional al desplazamiento de su núcleo que pasa a través de sus arrollamientos. Los LVDTs proveen una salida lineal para pequeños desplazamientos mientras el núcleo permanezca dentro del bobinado primario. La distancia exacta es función de la geometría del LVDT.

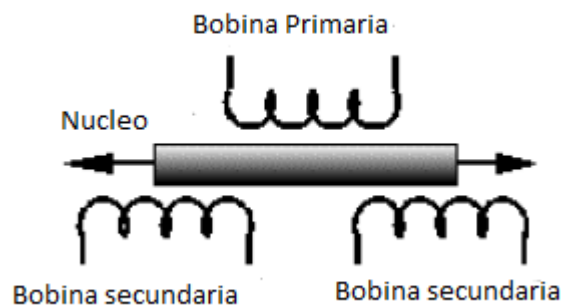


Fig. 16 Transformador LVDT

Un LVDT es muy parecido a cualquier otro transformador, el cual consta de un bobinado primario, bobinado secundario, y un núcleo magnético. Una corriente alterna, conocida como la señal portadora, se aplica en el bobinado primario.

CAPITULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 *HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN*

3.1.1 HIPÓTESIS GENERAL

El sistema de control activo protege una edificación durante un evento de sismo.

3.1.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

El esquema de funcionamiento de un sistema de control activo en la protección de una edificación durante un evento de sismo es óptimo.

El sistema de control activo reduce las aceleraciones en la estructura durante un evento de sismo.

3.2 *VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN*

3.2.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Ocurrencia de un evento de sismo.

3.2.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Desplazamiento lateral en la edificación durante un sismo.

CAPITULO IV

METODOLOGÍA O DISEÑO METODOLOGICO DE LA INVESTIGACIÓN

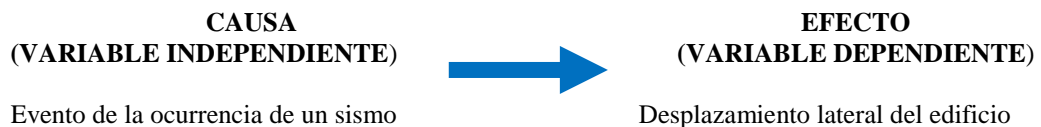
4.1 TIPO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El tipo de problema de investigación es aplicada y experimental con el enfoque cuantitativo-deductivo.

Es investigación **aplicada** se basa porque tiene como finalidad solucionar problemas de los desplazamientos laterales de una edificación durante el evento del sismo.

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El término experimental tiene al menos dos acepciones, una general y otra particular. La general se refiere a elegir o realizar una acción y después observar las consecuencias. La acepción particular del experimento, mas armónica con un sentido científico, se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (causas), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (efectos).



4.2.1 MANIPULACIÓN DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE

La manipulación o variación de la variable independiente, en el caso de la presente tesis es la ocurrencia de un evento de sismo.

Para generar señales de sismo, se emplearán una mesa vibratoria con desplazamiento horizontal que simula la acción sísmica sobre una edificación construida a escala.

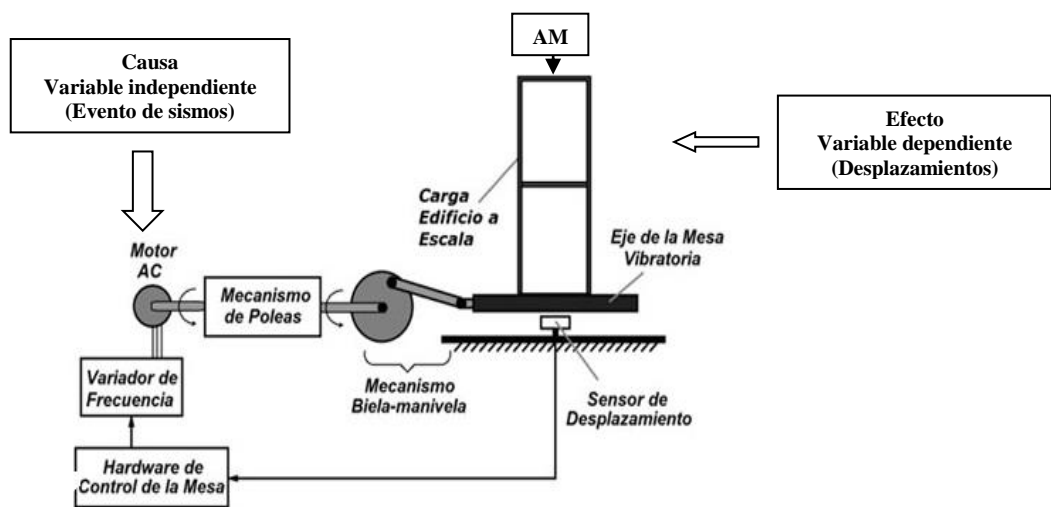


Fig. 17 Diseño del sistema de prueba

4.2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MESA VIBRATORIA

MESA VIBRATORIA; construida de perfiles de acero ASTM A-36, con las dimensiones de 0.50 m de largo por 0.40 m de ancho.

MECANISMO BIELA-MANIVELA; consta de un sistema biela-manivela para la conversión del movimiento rotacional del motor a un movimiento lineal.

VARIADOR DE FRECUENCIA; Equipo Electrónico encargado de la regulación automática del motor trifásico, para generar señales de sismo.

MOTOR TRIFASICO; Convierte la energía eléctrica en energía mecánica de rotación.

SENSOR DE DESPLAZAMIENTO; mide los desplazamientos laterales de la edificación

4.2.2 POBLACION DE LA INVESTIGACIÓN

La población constituye las categorías de edificaciones de acuerdo a la norma técnica E.030 (diseño sismoresistente)

Tabla. 4 Categoría de las edificaciones según reglamento de edificaciones RNE 0.30

CATEGORIA DE LAS EDIFICACIONES	
A: Edificaciones Esenciales	Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después que ocurra un sismo, como hospitales, centrales de comunicaciones, cuartele de bomberos y policía, subestaciones eléctricas, reservorios de agua, centros educativos y edificaciones que pueden servir de refugio después de un desastre.
B: Edificaciones Importantes	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas como teatros, estadios, centros comerciales, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos bibliotecas y archivos especiales. También se consideran depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento
C: Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes cuya falla ocasionaría pérdidas de cuantía inmediata como viviendas oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios, fugas de contaminaciones, etc.
D: Edificaciones Menores	Edificaciones cuyas fallas causan pérdidas de menor cuantía y normalmente la probabilidad de causar víctimas es baja, como cercos de menores de 1.50m de altura, depósitos temporales, pequeñas viviendas temporales y construcciones similares.

4.2.3 MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

La muestra de la investigación corresponde a una muestra de la población

A: Edificaciones Esenciales	Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después que ocurra un sismo, como hospitales, centrales de comunicaciones, cuartele de bomberos y policía, subestaciones eléctricas.
-----------------------------	--

4.2.4 UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA POBLACIÓN

El proyecto se encuentra ubicado en la ciudad de Juliaca departamento de Puno cuyas coordenadas son las siguientes

UBICACIÓN : 15°29'27''S
: 70°07'37''O
ALTITUD : 3824 msnm

4.3 SISTEMA ACTIVO DE CONTROL DE MASA (AMD)

En la presente tesis se considera un sistema de control activo del controlador de masas (AMD) para el aislamiento de vibraciones en una estructura experimental de tres pisos. Esta configuración se utiliza para evaluar las técnicas de diseño de control para aumentar la seguridad de las estructuras de ingeniería civil durante los terremotos. La estructura se compone de tres pisos con un conductor de masa activa en la planta superior, la cual se utiliza para atenuar las perturbaciones de tierra.

4.3.1 ESTRUCTURA EXPERIMENTAL

El modelo de la estructura esta basa en control activo de masa, la edificación consta de tres pisos sin vanos. El modelo está construido en estructuras de acero con una altura de 158cm. El peso de la masa total es de 227 kg distribuidos en los tres niveles de la edificación en escala.

Para la implementación del sistema de control activo de masa (AMD), esta se instala en el tercer piso de la estructura. El AMD consiste en un actuador hidráulico, incorporado con una masa de acero en el extremo de la barra del pistón. El servo actuador hidráulico tiene 3.8 cm de diámetro y 30.5cm de carrera. Para el experimento la masa en movimiento para el AMD tiene un peso de 5.2kg, consiste en un pistón, en la barra del pistón esta atornillado el disco de masa de acero. El peso total de la estructura incluida el AMD tiene 309kg.

La masa del AMD en movimiento representa el 1.7% de la masa total de la estructura. La posición del actuador se obtiene con el uso de un LVDT (linear variable differential transformer), instalado rígidamente entre el pistón y el tercer piso.

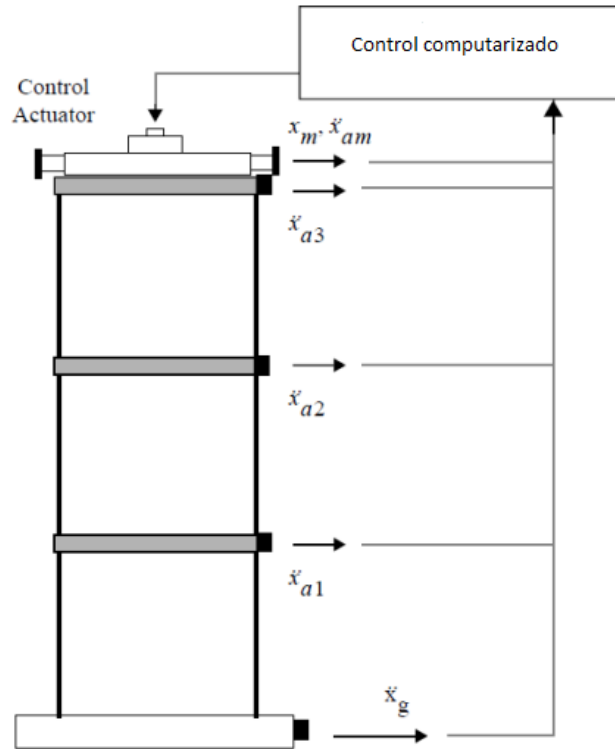


Fig. 18 Estructura Experimental del control activo AMD

4.3.1.1 MODELO DE EVALUACIÓN

Se representa en el modelo de espacio de estados de entradas y salidas para la estructura. El modelo tiene 28 estados y es de esta forma.

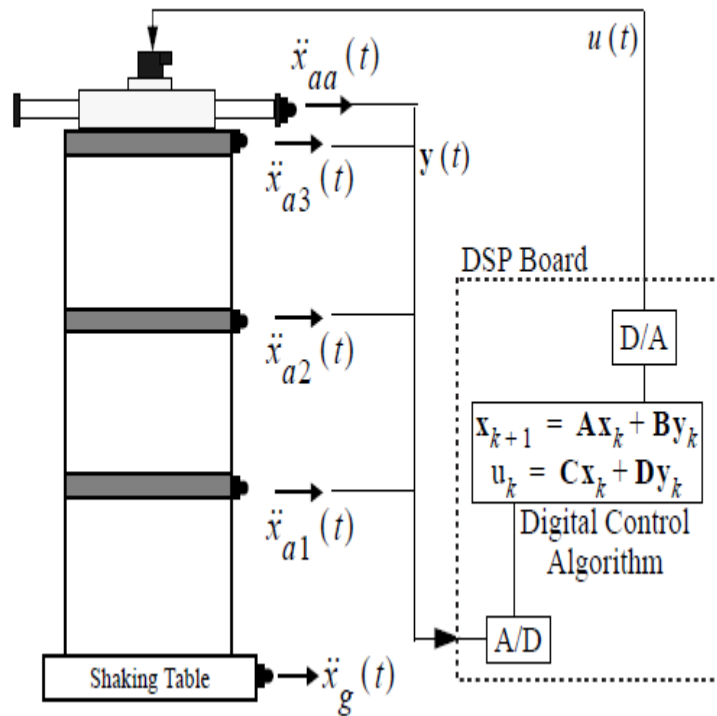


Fig. 19 Modelo de Evaluación del sistema control AMD

$$\dot{x} = Ax + Bu + E \ddot{x}_g$$

$$y = C_y x + D_y u + F_y \ddot{x}_g + v$$

$$z = C_z x + D_z u + F_z \ddot{x}_g$$

4.3.1.2 ANALISIS DEL SISTEMA DE CONTROL ACTIVO CON MATLAB

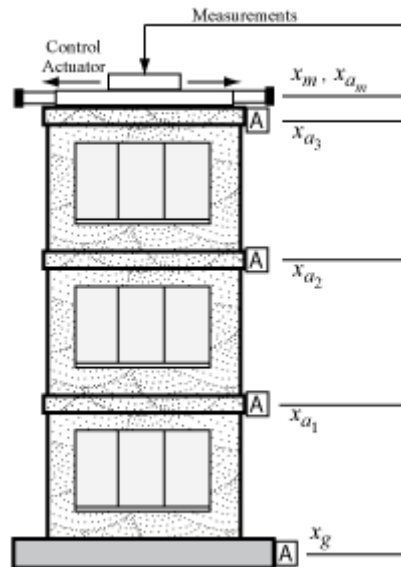


Fig. 20 Modelo de Analisis del sistema AMD con Matlab.

La planta de P es un modelo de 28 estados con los siguientes variables de estado:

- $x(i)$: desplazamiento de los entrepiso con respecto al suelo (cm)
- X_M : desplazamiento de AMD en relación con el 3 ° piso (cm)
- $xv(i)$: velocidad de la i-ésimo entrepiso en relación con el suelo (cm / s)
- xVM : velocidad de AMD con respecto al suelo (cm / s)
- $xa(i)$: aceleración de la i-ésimo entrepiso en relación con el suelo (g)
- Xam : aceleración de la AMD con respecto al suelo (g)
- $d(1) = x(1)$, $D(2) = x(2) - x(1)$, $D(3) = X(3) - x(2)$:

Desviaciones de inter-historia

Las entradas son la XAG aceleración del suelo (en g) y la señal de control u. Utilizamos $1 \text{ g} = 981 \text{ cm} / \text{s}^2$.

En el espectro de Fourier de la aceleración medida se suele identificar el periodo fundamental del edificio, como el de máxima amplitud espectral de menor frecuencia que se halla dentro del intervalo de frecuencias propias posibles del edificio.

La aceleración terremoto se modela como un proceso de ruido blanco filtrado a través de un Kanai-Tajimi filter.

```
zg = 0.3;    wg = 37.3;
S0 = 0.03*zg/(pi*wg*(4*zg^2+1));
num = sqrt(S0)*[2*zg*wg wg^2];
den = [1 2*zg*wg wg^2];

F = sqrt(2*pi)*tf(num,den);
F.InputName = 'n';    % white noise input

bodemag(F), grid, title('Kanai-Tajimi filter')
```

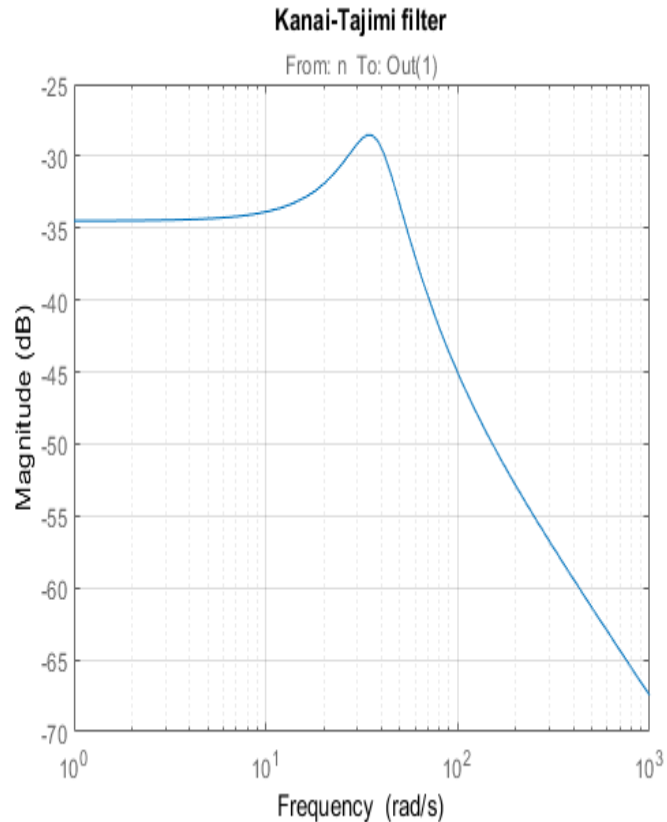


Fig. 21 Filtro Kanai-Tajimi

El efecto de un terremoto en la estructura de control puede ser simulado mediante la inyección de una entrada de ruido blanco n en la combinación de plantas-filtro.

```

% Add Kanai-Tajimi filter to the plant
PF = size(g)*append(F , 1);

% Standard deviations of open-loop drifts
CV = covar(PF('d','n'),1);
d0 = sqrt(diag(CV));

% Standard deviations of open-loop acceleration
CV = covar(PF('xa','n'),1);
xa0 = sqrt(diag(CV));

% Plot open-loop RMS values
clf, bar([d0 ; xa0])
title('Drifts and accelerations for uncontrolled structure')
ylabel('Standard deviations')

set(gca,'XTickLabel',{'d(1)','d(2)','d(3)','xa(1)','xa(2)','xa(3)'})

```

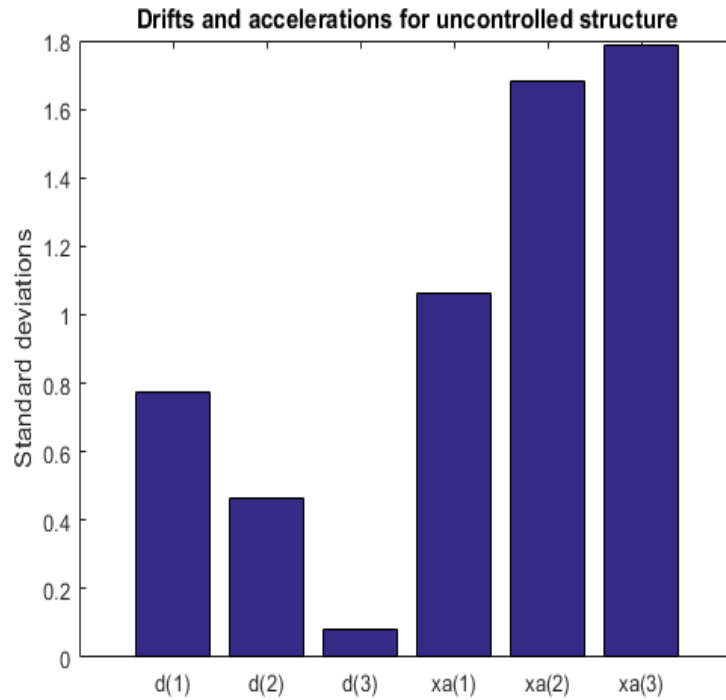


Fig. 22 Desplazamientos relativos sin control en la estructura de prueba

La estructura de control se representa de la siguiente forma

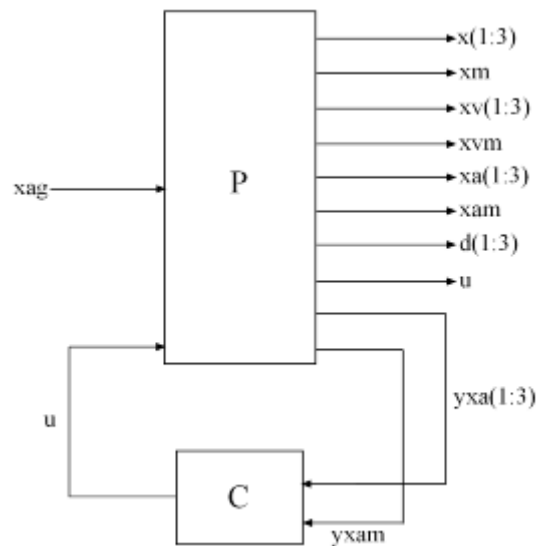


Fig. 23 Modelo de Control Estructural AMD

El controlador C utiliza mediciones y_{xa} e y_{xam} de x_a y X_{am} para generar la señal de control u . Físicamente, el control u es una corriente

eléctrica de accionamiento de un accionador hidráulico que mueve las masas de la AMD. Los requisitos de diseño implican:

- Reducción al mínimo de la inter-historia deriva $d(i)$ y aceleraciones $x_a(i)$
- Las restricciones duras sobre el esfuerzo de control en términos de masa x_m desplazamiento, X_{am} masa por la aceleración, y el esfuerzo de control u .

Todos los requisitos de diseño se evalúan en términos de desviaciones estándar de las señales correspondientes.

```
% Soft requirements on drifts and accelerations
Soft = [...
    TuningGoal.Variance('n','d(1)', d0(1)) ; ...
    TuningGoal.Variance('n','d(2)', d0(2)) ; ...
    TuningGoal.Variance('n','d(3)', d0(3)) ; ...
    TuningGoal.Variance('n','xa(1)', xa0(1)) ; ...
    TuningGoal.Variance('n','xa(2)', xa0(2)) ; ...
    TuningGoal.Variance('n','xa(3)', xa0(3))];

% Hard requirements on control effort
Hard = [...
    TuningGoal.Variance('n','xm', 3) ; ...
    TuningGoal.Variance('n','xam', 2) ; ...
    TuningGoal.Variance('n','u', 1)];
```

El controlador permite sintonizar prácticamente cualquier estructura del controlador sujeto a estos requisitos. La complejidad del controlador se puede ajustar por ensayo y error, a partir de lo suficientemente alta para calibrar los límites de rendimiento, a continuación, la reducción de la orden hasta que se observa una degradación de rendimiento notable.

```
C = tunableSS('C',5,1,4);
C.d.Value = 0;
C.d.Free = false; % Fix feedthrough to zero

% Build tunable closed-loop model
T0 = lft(PF,C);

% Tune controller parameters
[T,fSoft,gHard] = systune(T0,Soft,Hard);

Final: Soft = 0.601, Hard = 0.97239, Iterations = 160
```


Calcular las desviaciones estándar de las derivas y aceleraciones para la estructura controlada y comparar con los resultados no controlados. El sistema de control AMD produce reducción significativa tanto de la deriva y la aceleración.

```

% Standard deviations of closed-loop drifts
CV = covar(T('d','n'),1);
d = sqrt(diag(CV));

% Standard deviations of closed-loop acceleration
CV = covar(T('xa','n'),1);
xa = sqrt(diag(CV));

% Compare open- and closed-loop values
clf, bar([d0 d; xa0 xa])
title('Drifts and accelerations')
ylabel('Standard deviations')
set(gca,'XTickLabel',{'d(1)','d(2)','d(3)','xa(1)','xa(2)',
'xa(3)'});
legend('Uncontrolled','Controlled','location','NorthWest')

```

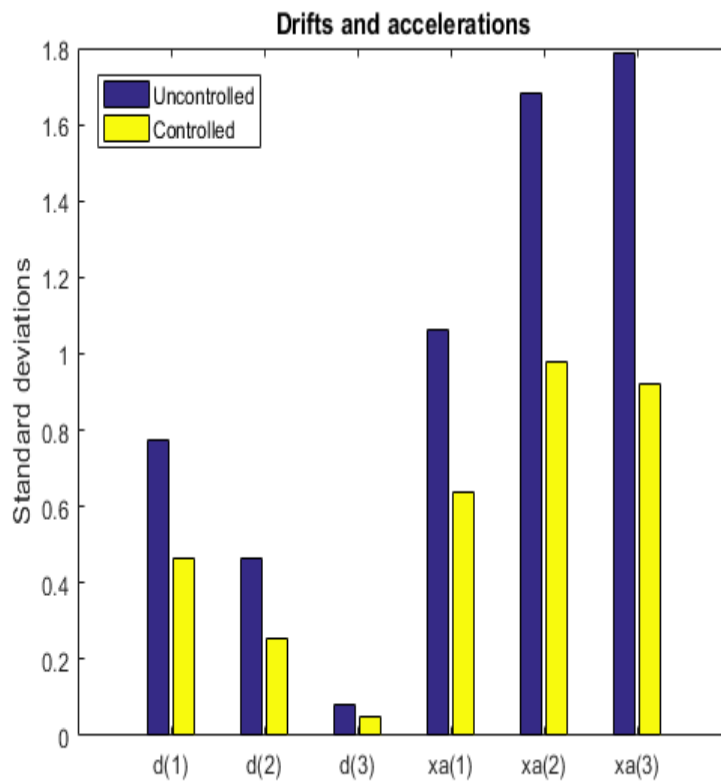


Fig. 24 Desplazamientos y aceleraciones en la edificación de prueba aplicando control AMD

Simular la respuesta de la estructura de 3 pisos a una excitación terremoto similar tanto en lazo abierto y cerrado. La aceleración terremoto se modela como un proceso de ruido blanco de color por el filtro Kanai-Tajimi.

```

% Sampled white noise process
rng('default')
dt = 1e-3;
t = 0:dt:500;
n = randn(1,length(t))/sqrt(dt); % white noise signal
% Open-loop simulation
ysimOL = lsim(PF(:,1), n , t);
% Closed-loop simulation
ysimCL = lsim(T, n , t);
% Drifts
clf, subplot(311);
plot(t,ysimOL(:,13),'b',t,ysimCL(:,13),'r'); grid;
title('Inter-story drift d(1) (blue=open loop, red=closed loop)'); ylabel('cm');
subplot(312); plot(t,ysimOL(:,14),'b',t,ysimCL(:,14),'r');
grid;
title('Inter-story drift d(2)'); ylabel('cm');
subplot(313); plot(t,ysimOL(:,15),'b',t,ysimCL(:,15),'r');
grid;
title('Inter-story drift d(3)'); ylabel('cm');

```

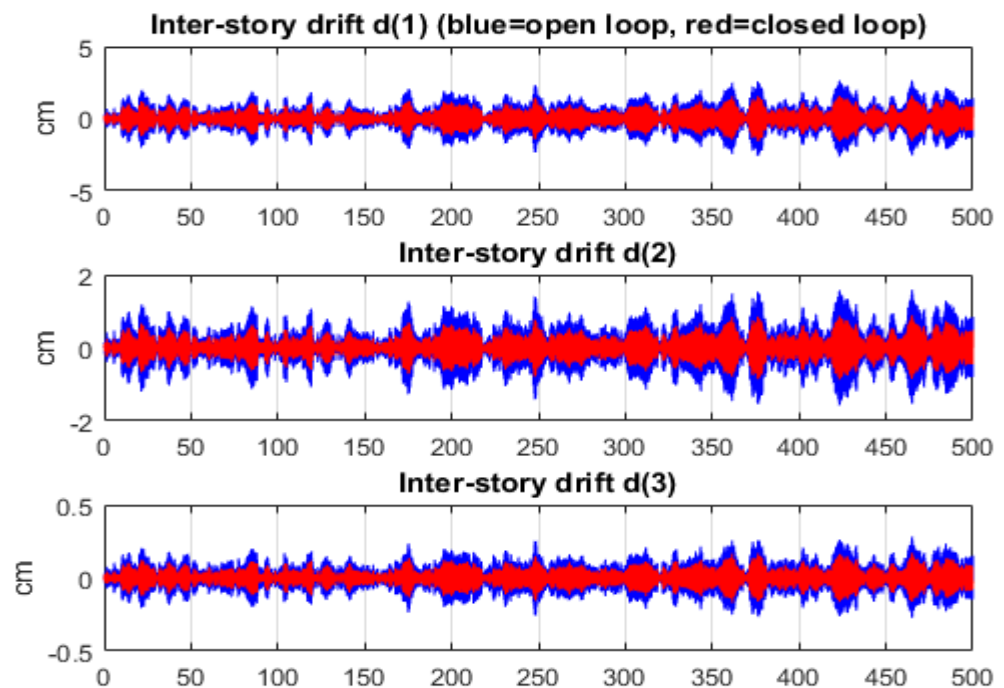


Fig. 25 Aplicación del sistema de control sobre una señal sísmica de desplazamiento

```

% Accelerations
clf, subplot(311);
plot(t,ysimOL(:,9),'b',t,ysimCL(:,9),'r'); grid;
title('Acceleration of 1st floor xa(1) (blue=open loop,
red=closed loop)'); ylabel('g');
subplot(312); plot(t,ysimOL(:,10),'b',t,ysimCL(:,10),'r');
grid;
title('Acceleration of 2nd floor xa(2)'); ylabel('g');
subplot(313); plot(t,ysimOL(:,11),'b',t,ysimCL(:,11),'r');
grid;
title('Acceleration of 3rd floor xa(3)'); ylabel('g');

```

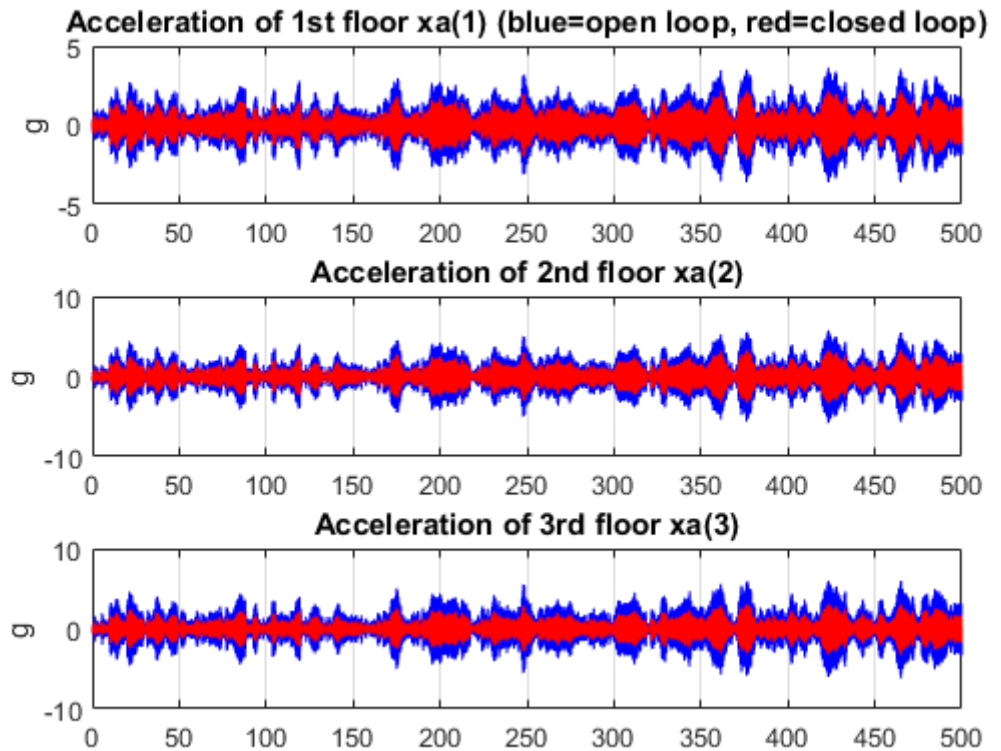


Fig. 26 Aplicación del sistema de control sobre una señal de aceleración

```

% Control variables
clf, subplot(311); plot(t,ysimCL(:,4),'r'); grid;
title('AMD position xm'); ylabel('cm');
subplot(312); plot(t,ysimCL(:,12),'r'); grid;
title('AMD acceleration xam'); ylabel('g');
subplot(313); plot(t,ysimCL(:,16),'r'); grid;
title('Control signal u');

```

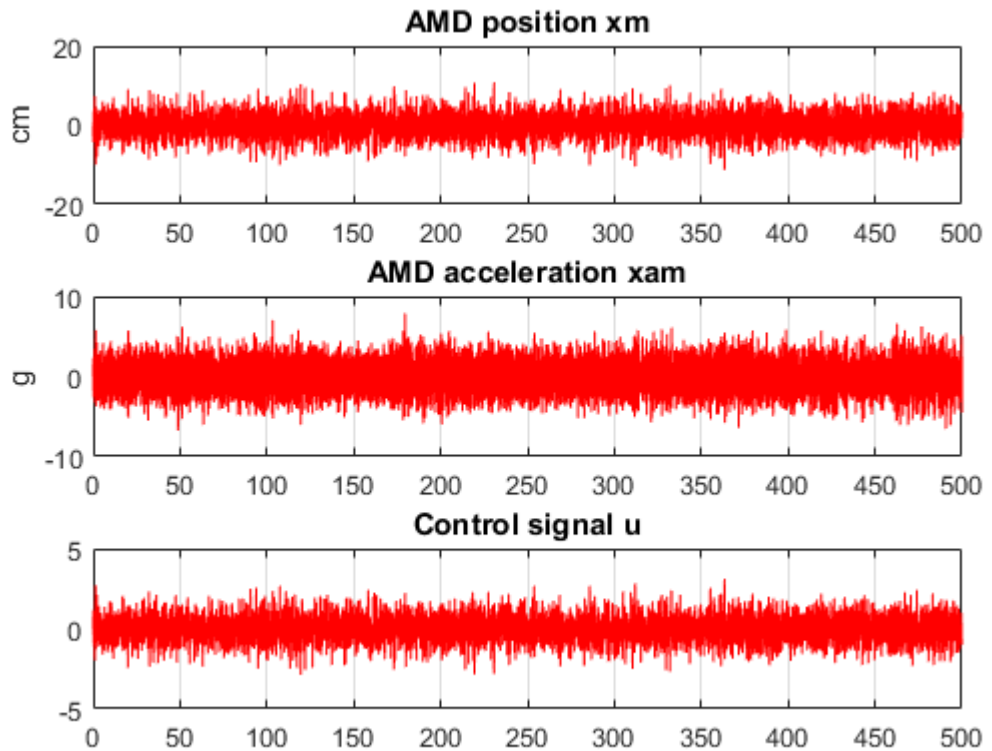


Fig. 27 Señales de control del sistema AMD

Trazar la raíz cuadrada media (RMS) de las señales simuladas, tanto para los escenarios controlados y no controlados. Suponiendo ergodicidad, el rendimiento RMS puede estimarse a partir de un único suficientemente largo simulación del proceso y coincide con las desviaciones estándar calculadas anteriormente. De hecho la trama RMS acerque a la trama desviación estándar obtenida anteriormente

```
clf, bar([std(ysimOL(:,13:15)) std(ysimOL(:,9:11)) ; ...
std(ysimCL(:,13:15)) std(ysimCL(:,9:11))])
title('Drifts and accelerations')
ylabel('Simulated RMS values')
set(gca, 'XTickLabel', {'d(1)', 'd(2)', 'd(3)', 'xa(1)', 'xa(2)', 'xa(3)'})
legend('Uncontrolled', 'Controlled', 'location', 'NorthWest')
```

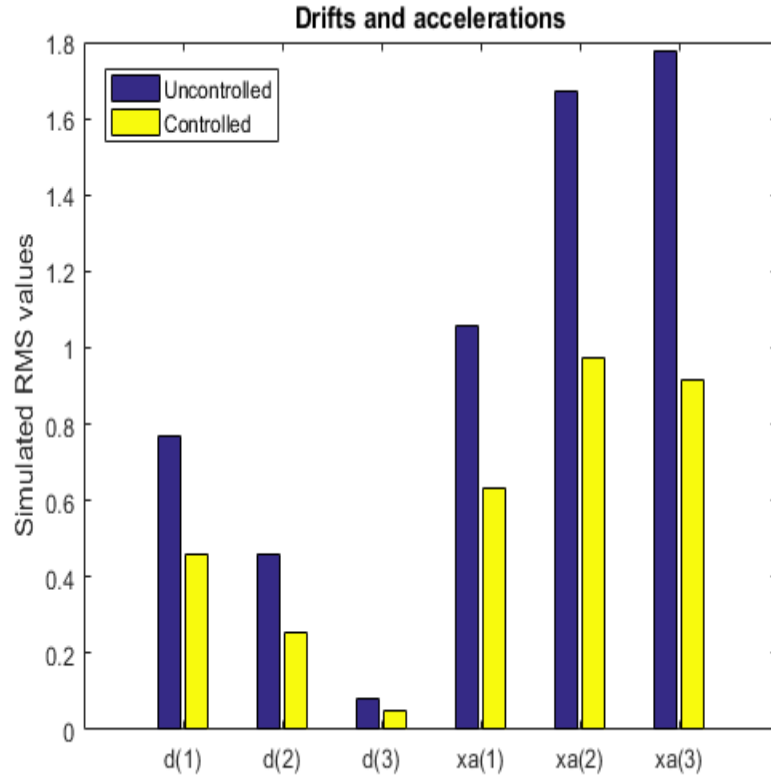


Fig. 28 Desplazamientos y aceleraciones aplicado RMS

En general, el controlador logra una reducción significativa de la vibración del suelo tanto en términos de desplazamiento y aceleración para todas las historias de tiempo que satisface las restricciones duras sobre el esfuerzo de control y el desplazamiento de masa.

Es sistema de control AMD se probó en los acelerogramas de los recientes sismos ocurridos en el Perú tales como el sismos de Ocoña del 2001 y sismos del Ica del año 2007, como se muestra a continuación.

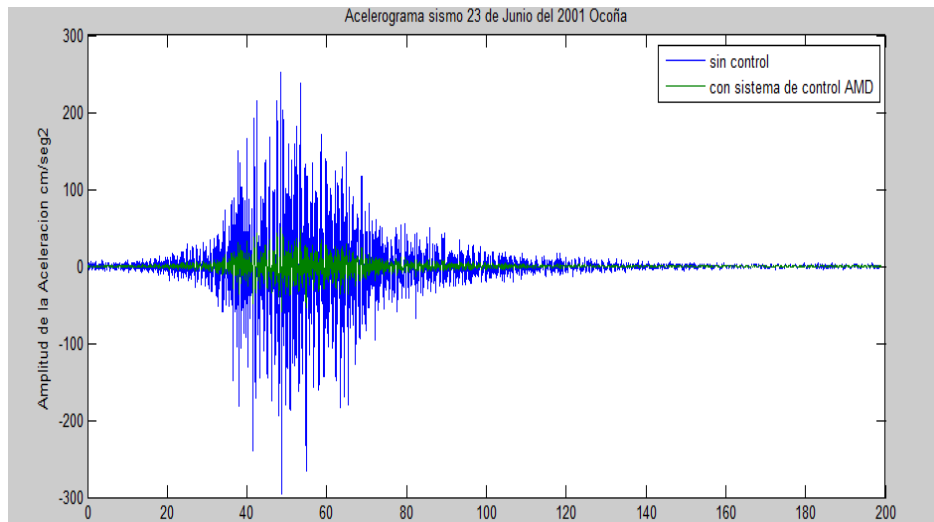


Fig. 29 Respuesta del sistema de control activo AMD sobre el acelerograma del sismo del 23 de Junio del 2001 Ocoña.

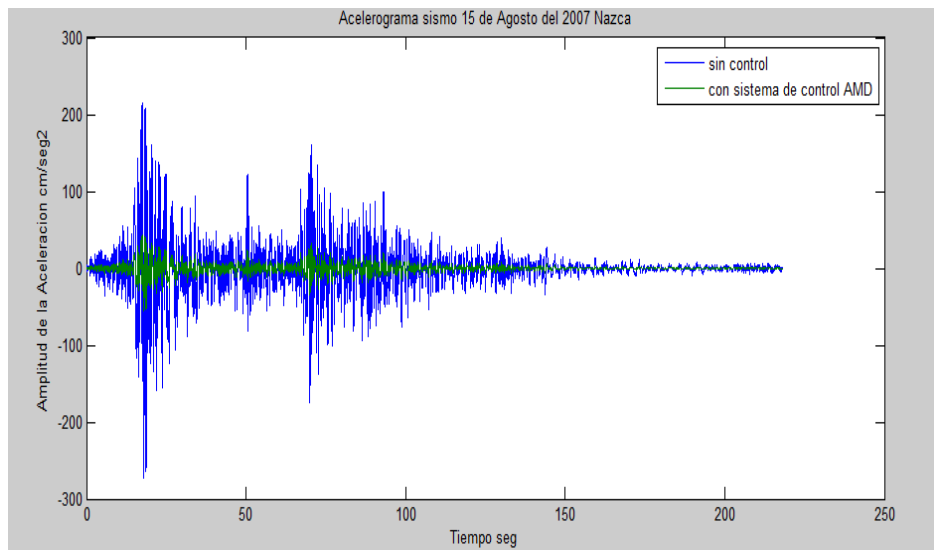


Fig. 30 Respuesta del sistema de control activo AMD sobre el acelerograma del sismo del 15 de agosto del 2007 Nazca.

Tabla. 5 Respuesta de mediciones RMS en la edificación (0-50Hz)

Controlador	\ddot{x}_{a1} (cm/s ²)	\ddot{x}_{a2} (cm/s ²)	\ddot{x}_{a3} (cm/s ²)	x_a (cm)	\ddot{x}_{aa} (cm/s ²)	u
Sin control	128.5	6.9	190.00	-		
Controlador	29.00	30.00	33.00	0.225	505.00	0.05

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Al terminar el proceso de investigación se concluye que el sistema de control activo protege una edificación durante un evento de sismo, tal como se muestra en los resultados de la experimentación.

El esquema de funcionamiento del sistema de control activo es óptimo para la protección de una edificación durante un evento de sismo.

El sistema de control activo reduce las aceleraciones hasta el 80%, en consecuencia se protege la edificación.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda a las instituciones del estado peruano, que están involucrados en con el tema del diseño sismorresistente de edificaciones implementar centros de estudios y laboratorios especializados para realizar distintas pruebas.

Se recomienda incorporar en la nueva norma técnica E.030 de diseños sismorresistente, el sistema de control activo en la protección de edificaciones.

Se recomienda la integración de las demás ciencias como la ingeniería mecánica, control, electrónica para conseguir resultados más satisfactorios.

En virtud de una excitación de banda ancha, el controlador AMD fue capaz de conseguir aproximadamente la reducción de 80% en las respuestas de aceleración RMS y una reducción significativa respuesta en los tres modos del sistema.

Cuando es excitado por una perturbación terremoto.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, B., & Moore, J. (1971). *Linear Optimal Control*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Bendat, J., & Piersol, A. (2006). *Bench-Scale Experiment for Structural*.
- Bozzo, L., & Ordoñez, D. (2001). *Disipadores mecánicos de energía*. España: Revista BIT. Barcelona.
- Cheng, D. (1959). *Analysis of Linear Systems*. Addison: Wesley.
- Christenson, R. (2001). *Semiactive Control of Civil Structures For Natural Hazard Mitigation*. Indiana.
- Craig Jr, R. (1981). *Structural Dynamics*. New York: John Wiley.
- EERI -Earthquake Engineering Research Institute. (2009). *Reconnaissance Report on the Seismological*. Oakland.
- F.J.M, B., & W.G., C. (1977). *Shear Strength of Low Rise Walls with Boundary Elements*. USA.
- Garcia Reyes, L. E. (1998). *Dinamica Estructural Aplicada al Diseño Sismico*. Bogota: Universidad los Andes.
- Hernandez Sampieri , R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodologia de la Investigación*. Mexico: McGraw Hill/ Interamericana Editores S.A. Mexico.
- Kim, D., Kwin, H., & Jeong, M. (2000). *An experimental study of the dynamic characteristics of viscous fluid dampers for base isolated buildings*. New Zealand: 12 th World Conference on Earthquake Engineering.
- McCormac, J., & Brown, R. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. Mexico: AlfaOmega.
- Ogata, K. (2010). *Ingenieria de Control Moderna*. Madrid: Pearson Education.
- RNE. (2012). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima: MegaByte.
- Spencer, B. (19988). Benchmark Problems in Structural Control. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1127-1139.
- Villarreal G, O. R. (2009). *Edificaciones con Disipadores de Energia*. Lima: San Marcos.